

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikačnej techniky**

**Štúdium vplyvu modulácie LED na fotometrické veličiny  
a homogenitu vyžarovania automobilového svetla**

**Study effect of LED modulation on photometric quantities  
and beam homogeneity from automotive lighting**

**2015**

**Bc. Peter Hajduk**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Peter Hajduk**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: Studium vlivu modulace LED na fotometrické veličiny a homogenitu  
vyzařování automobilového světla  
Study Effect of LED Modulation on Photometric Quantities and Beam  
Homogeneity from Automotive Lighting

### Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti zdrojů optického záření LED používaných v automobilovém průmyslu pro konstrukci světel.
2. Změřte a proveďte analýzu fotometrických veličin a homogenitu vyzařovaného optického záření vzorku automobilového světla využívající LED technologii.
3. Pomocí modulátoru proveďte modulaci jednotlivých LED segmentů funkce denního svícení DRL v automobilovém světlometu. Analyzujte přenosové vlastnosti a šířku pásma.
4. Vyhodnoťte fotometrické veličiny a homogenitu vyzařovaného světla při použití pokročilejších modulačních formátů.
5. Určete maximální frekvenci nosné vlny, při které zůstávají fotometrické parametry a homogenita vyzařovaného světla na přijatelné úrovni (maximální rozdíl ve světelném toku 5 %).

### Seznam doporučené odborné literatury:

SCHUBERT, E. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-6538-7.


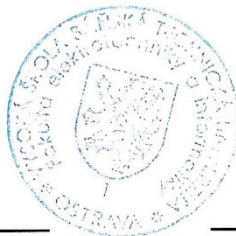
HRANILOVIC, Steve. *Wireless optical communication systems*. New York: Springer, 2005. ISBN 03-872-2784-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 01.09.2014


Datum odevzdání: 07.05.2015

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 6. mája 2015



podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Rád by som sa poďakoval Ing. Petrovi Koudelkovi za užitočnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní tejto diplomovej práce. Taktiež ďakujem spoločnosti Varroc Lighting Systems s.r.o. za odborné konzultácie a poskytnuté materiály. V neposlednom rade by som rád poďakoval Ing. Radkovi Martinkovi za jeho pomoc pri spracovaní softvéru a hardwaru od firmy National Instruments.

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá problematikou optických bezvláknových dátových sietí využívajúcich pre prenos oblasť viditeľného optického žiarenia VLC, konkrétne možnosťou využitia tejto technológie pri komunikácii medzi vozidlami V2V s nasadením LED vysielacieho systému v podobe DRL svetlometu Jaguar XK model 2011. Práca sa v úvodných kapitolách venuje súčasným zahraničným štúdiám v oblasti V2V komunikácie a rovnako rozoberá automobilové komunikačné zbernicové systémy. Praktická časť je tvorená súborom meraní s navrhnutým konceptom vysielacieho systému v laboratóriu temná miestnosť na Vysokej škole báňskej – Technickej univerzity Ostrava a výskumnom oddelení firmy Varroc Lighting Systems s.r.o. Analyzujú sa prenosové vlastnosti LED vysielача prostredníctvom dostupných prístrojov a príslušného softvéru (LabVIEW 2014, VSG NI PXI-5670, VSA NI PXI-5661) a vplyv optickej komunikácie na fotometrické veličiny a homogenitu vyžarovania DRL svetlometu Jaguar XK vzhľadom k predpisu ECE R 87.

## **Kľúčové slová**

Optická bezvláknová dátová sieť; LED; DRL; fotometrická veličina; homogenita; VLC; Bias-Tee; pokročilý modulačný formát; V2V komunikácia; Jaguar XK.

## **Abstract**

The master thesis is dedicated to optic wireless data networks which use for the transmission the area of visible optical radiation VLC, namely with the possibility of using this technology in communication between vehicles V2V with the use LED broadcasting system in the form of DRL headlight Jaguar XK model 2011. The introductory chapters are about contemporary current foreign studies in V2V communications and it is also about the automobile communication bus systems. In the practical part is set of measurements with the proposed concept of the broadcasting system in the lab dark room at the VSB - Technical University of Ostrava and the research departments of the company Varroc Lighting System Ltd. The analyze the transmission characteristics of LED transmitter through the available devices and related software (LabVIEW 2014, VSG NI PXI-5670, NI PXI VSA-5661) and the influence on optical communication photometric quantities and beam homogeneity of the DRL headlight Jaguar XK according to regulation ECE R 87th.

## **Key words**

Optical wireless data network; LED; DRL; photometric quantity; beam homogeneity; VLC; Bias-Tee; advanced modulation format; V2V communication; Jaguar XK.

## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>H</b>	J.s	Plancková konštanta ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ )
<b>e</b>	C	Elementárny náboj elektrónu ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ )
<b>U</b>	V	Prahové napätie diódy
<b><math>\Phi</math></b>	lm	Svetelný tok
<b><math>K(\lambda)</math></b>	lm.W <sup>-1</sup>	Svetelný účinok
<b><math>V(\lambda)</math></b>	-	Pomerná svetelná účinnosť
<b><math>\Omega</math></b>	sr	Priestorový uhol
<b>A</b>	m <sup>2</sup>	Plocha
<b>r</b>	m	Polomer
<b>l</b>	m	Vzdialenosť
<b>I</b>	cd	Svietivosť zdroja
<b>E</b>	lx	Intenzita osvetlenia
<b>L</b>	cd.m <sup>-2</sup>	Jas zväzku svetelných paprskov
<b><math>\alpha</math></b>	-	Integrálny činiteľ pohltienia
<b><math>\tau</math></b>	-	Integrálny činiteľ prestupu
<b>p</b>	-	Integrálny činiteľ odrazu
<b>P</b>	W	Optický výkon
<b>T</b>	°C	Teplota
<b>I</b>	A	Elektrický prúd
<b><math>\Lambda</math></b>	nm	Vlnová dĺžka svetla
<b><math>v_m</math></b>	Bd	Modulačná rýchlosť
<b>a</b>	s <sup>-1</sup>	Doba trvania symbolu
<b><math>v_p</math></b>	bit	Prenosová rýchlosť

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
<b>AFS</b>	Adaptive Frontlighting Systems (Adaptívny systém predného osvetlenia)
<b>AlGaAs</b>	aluminium gallium arsenide
<b>AlGaInP</b>	aluminium gallium indium phosphide
<b>AlGaN</b>	aluminum gallium nitride
<b>AlGaP</b>	aluminium gallium phosphide
<b>AlInGaP</b>	aluminum Indium gallium phosphide
<b>AlN</b>	aluminium nitride
<b>AOV</b>	Angle-Of-View (Uhol pohľadu)
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying (Amplitúdové kľúčovanie)
<b>BER</b>	Bit Error Rate (Bitová chybovosť)
<b>CAN</b>	Controller Area Network (Sieťový komunikačný protokol)
<b>CIE</b>	International Commission on Illumination (Medzinárodná komisia pre osvetľovanie)
<b>DPSK</b>	Differential Phase Shift Keying (Diferenciálne fázové kľúčovanie)
<b>DRL</b>	Daytime Running Light (Denné svietenie)
<b>ECE</b>	Economic Commission for Europe (Európska hospodárska komisia OSN)
<b>EHK</b>	Európska hospodárska komisia
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying (Kmitočtové kľúčovanie)
<b>GaAs</b>	gallium arsenide
<b>GaAsP</b>	gallium arsenide phosphide
<b>GaN</b>	gallium nitride
<b>GaP</b>	gallium phosphide
<b>HID</b>	High Intensity Discharge (Vysokotlaková výbojka)
<b>InGaN</b>	indium gallium nitrid
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode (Svetlo emitujúca dióda)
<b>LIN</b>	Local Interconnect Network (Lokálna prepojovacia sieť)
<b>LOS</b>	Line-Of-Sight (Priama viditeľnosť)



---

<b>MOST</b>	Media Oriented Systems Transport (Multimediálna automobilová zbernica)
<b>OLED</b>	Organic Light-Emitting Diode (Organická svetlo emitujúca dióda)
<b>OSN</b>	Organizácia spojených národov
<b>OWC</b>	Optical Wireless Communication (Optická bezvláknová komunikácia)
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying (Fázové kľúčovanie)
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation (Kvadratúrna amplitúdová modulácia)
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying (Kvadratúrne fázové kľúčovanie)
<b>SER</b>	Symbol Error Rate (Symbolová chybovosť)
<b>SiC</b>	silicon carbide
<b>VLC</b>	Visible Light Communication (Optické žiarenie vo viditeľnej oblasti spektra)
<b>V2V</b>	Vehicle-to-Vehicle (Komunikácia medzi vozidlami)
<b>YAG</b>	yttrito-hlinový granát
<b>YAG:Ce</b>	žltý luminofor ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}_3$ )

---

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Zdroje optického žiarenia využívajúce viditeľnú oblasť spektra v automobilovom priemysle.....	- 2 -
1.1 Priamo emitujúce svetelné žiarenie .....	- 2 -
1.2 Organická svetlo emitujúca dióda .....	- 4 -
1.3 Projekčné LED svetlomety.....	- 5 -
2 Parametre LED používaných v automobilovom priemysle.....	- 7 -
2.1 Fotometrické vlastnosti LED.....	- 7 -
2.1.1 Svetelný tok.....	- 7 -
2.1.2 Priestorový uhol .....	- 8 -
2.1.3 Svietivosť .....	- 9 -
2.1.4 Intenzita osvetlenia.....	- 10 -
2.1.5 Jas.....	- 11 -
2.1.6 Svetelnotechnické vlastnosti materiálu .....	- 11 -
2.1.7 Teplota svetla .....	- 12 -
2.2 Elektrické vlastnosti LED.....	- 13 -
2.2.1 Volt-Ampérová charakteristika .....	- 13 -
2.2.2 Prevodová charakteristika .....	- 13 -
2.2.3 Teplotná závislosť .....	- 14 -
3 Aplikácie LED používané v automobilovom priemysle .....	- 16 -
3.1 Reflektory.....	- 16 -
3.2 Šošovky .....	- 18 -
3.3 Refraktory.....	- 18 -
3.4 Svetlovody.....	- 19 -
4 Svetlomet Jaguar XK .....	- 21 -
4.1 Experimentálne meranie základných parametrov denného svietenia Jaguar XK .....	- 23 -
4.1.1 Volt-Ampérová charakteristika DRL .....	- 24 -
4.1.2 Prevodová charakteristika DRL .....	- 25 -

4.1.3	Spektrálna charakteristika DRL .....	- 25 -
4.1.4	Vyžarovacia charakteristika DRL .....	- 26 -
4.2	Experimentálne meranie fotometrických veličín a homogenity vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK.....	- 27 -
4.2.1	Analýza fotometrických veličín vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK.....	- 27 -
4.2.2	Analýza homogenity vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK.....	- 29 -
5	Optické bezvláknové dátové siete .....	- 31 -
5.1	Obečný model optického bezvláknového kanálu .....	- 31 -
5.2	Optická komunikácia medzi vozidlami V2V .....	- 32 -
5.2.1	Prehľad optického V2V komunikačného systému .....	- 34 -
5.2.2	Optický komunikačný senzor OCI .....	- 35 -
5.2.3	Optický systém kamerového prijímača a LED vysielacza .....	- 36 -
5.2.4	Optický V2V komunikačný systém.....	- 37 -
6	Komunikačné zbernicové systémy v automobile .....	- 38 -
6.1	FlexRay .....	- 38 -
6.1.1	Prenosová štruktúra štandardu FlexRay .....	- 39 -
6.2	LIN .....	- 39 -
6.3	CAN.....	- 40 -
6.4	MOST .....	- 40 -
7	Koncept vysielacieho systému Jaguar XK .....	- 41 -
7.1	Návrh vysielacieho systému J.1.....	- 42 -
7.1.1	Bias-Tee ZX85-12G+ .....	- 42 -
7.2	Testovanie vysielacieho systému J.1 .....	- 43 -
8	Digitálne modulácie .....	- 45 -
8.1	Parametre digitálnych modulácií.....	- 45 -
8.1.1	Šírka pásma .....	- 45 -
8.1.2	Pravdepodobnosť chyby.....	- 45 -
8.1.3	Modulačná rýchlosť.....	- 46 -
8.1.4	Prenosová rýchlosť.....	- 46 -
8.2	Metódy vyhodnocovania parametrov digitálnych modulácií .....	- 46 -

8.2.1	IQ diagram.....	- 47 -
8.2.2	Vektorový diagram.....	- 47 -
8.2.3	EVM.....	- 47 -
8.2.4	MER.....	- 48 -
8.2.5	Oko diagram.....	- 49 -
8.2.6	BER.....	- 49 -
9	Testované modulácie.....	- 50 -
9.1	Signálový generátor RF VSG NI PXI-5670.....	- 51 -
9.2	Signálový analyzátor RF VSA NI PXI-5661.....	- 52 -
9.3	Fázové kľúčovanie.....	- 52 -
9.3.1	Prenosová rýchlosť M-PSK.....	- 55 -
9.3.2	Chybovosť M-PSK.....	- 57 -
9.4	Kvadrátúrna amplitúdová modulácia.....	- 58 -
9.4.1	Prenosová rýchlosť M-QAM.....	- 61 -
9.4.2	Chybovosť M-QAM.....	- 62 -
10	Vyhodnotenie optických vlastností DRL svetlometu pri použití pokročilých modulačných formátov.....	- 64 -
10.1	Vyhodnotenie fotometrických veličín optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK.....	- 64 -
10.2	Vyhodnotenie homogenity optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK.....	- 65 -
10.3	Štatistická analýza nosnej frekvencie.....	- 67 -
10.3.1	Štatistická analýza modulácií M-PSK.....	- 68 -
10.3.2	Štatistická analýza modulácií M-QAM.....	- 69 -
	Záver.....	- 71 -
	Použitá literatúra.....	- 73 -
	Zoznam príloh.....	- 77 -

# Úvod

Téma diplomovej práce sa zaoberá optickými bezvláknovými dátovými sieťami využívajúcich oblasť viditeľného optického žiarenia VLC (Visible Light Communication) so zameraním na komunikáciu medzi vozidlami V2V (Vehicle-to-Vehicle). Táto technológia zaznamenáva dynamický rast hlavne vďaka inovatívnym výskumom, ktoré vyplývajú zo snahy Európskej únie reagovať na prudký nárast nehodovosti a s tým spojeného počtu úmrtí na cestnej premávke. Dôraz je v súčasnosti kladený na zvýšenie aktívnej a pasívnej bezpečnosti, a teda na dva základy vonkajšieho automobilového osvetlenia – vidieť a byť videný.

Automobilové svetlomety využívajúce svetlo emitujúcej diódy LED (Light-Emitting Diode) k optickej bezvláknovej komunikácii OWC (Optical Wireless Communication) sú posledným vývojovým trendom v oblasti osvetľovacej techniky automobilu. Optický zdroj využívajúci LED technológiu predstavuje vhodné zariadenie pre odosielanie optického signálu z dôvodu možnosti modulovania vysokých prenosových rýchlostí. Táto skutočnosť predurčuje komunikáciu založenú na OWC stať sa systémom blízkej budúcnosti.

Práca obsahuje tri hlavné časti pozostávajúce z teoretického rozboru danej problematiky a praktickej časti, ktorú tvoria experimentálne merania v priestoroch Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava v laboratóriách Katedry telekomunikačnej techniky a meraniami na výskumnom oddelení firmy Varroc Lighting Systems s.r.o.

Teoretickú časť diplomovej práce tvorí päť kapitol zaoberajúcich sa analýzou zdrojov optického žiarenia LED vrátane ich parametrov a používaných aplikácií, súčasným štúdiám v oblasti V2V komunikácie a automobilovým komunikačným zbernicovým systémom. Hlavný dôraz je kladený na možnosť nasadenia svetlometu využívajúceho LED technológiu ako optického vysielača v komunikácii V2V.

Praktické experimentálne merania na VŠB – TU Ostrava sa sústreďujú na testovanie navrhnutého vysielačieho systému využívajúceho DRL svetlometu Jaguar XK k odosielaniu optického signálu s využitím pokročilých modulačných formátov. Vyhodnotenie možnosti komunikácie prebieha analýzou dosiahnuteľných prenosových rýchlostí a chybovosti prenosu v podobe parametra MER a  $EVM_{RMS}$  vzhľadom k stanoveným referenčným vzdialenostiam. Ďalej sú prevedené testy možnosti nasadenia pôvodnej riadiacej elektroniky svetlometu v návrhu vysielačieho systému a štatistická analýza vplyvu pokročilých modulačných formátov na zmenu optického výkonu DRL v sofistikovanom nástroji Statgraphics Centurion XVII.

Záverečné testovanie svetlometu vo firme Varroc Lighting Systems s.r.o. sa venuje analýze fotometrických veličín a homogenity vyžarovania optického žiarenia funkcie DRL pri použití pôvodnej riadiacej elektroniky svetlometu a následne po nasadení navrhnutého vysielačieho systému. Výsledky sú štatisticky vyhodnotené vzhľadom k zákonným predpisom ECE R 87 týkajúcich sa denného svietenia svetlometu.

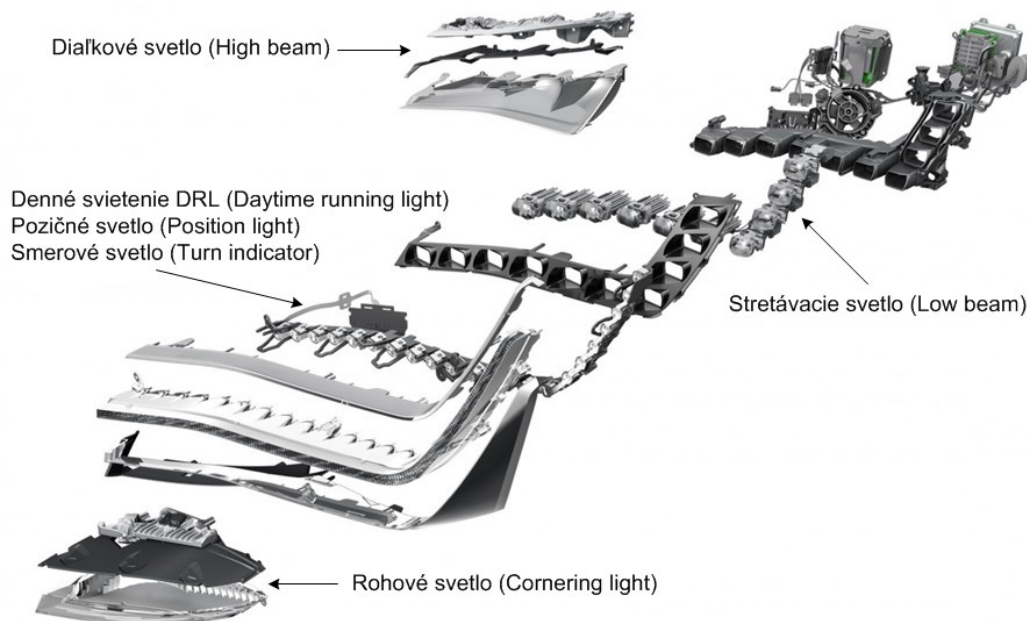
# 1 Zdroje optického žiarenia využívajúce viditeľnú oblasť spektra v automobilovom priemysle

Osvetlenie vonkajšej časti automobilu prechádza dynamickým rozvojom technológií zdrojov svetelného žiarenia, ako aj napredujúcemu vývoju konštrukcií moderných svetlometov a ich zdokonaľovaníu. Pôvodné nároky na funkcionality osvetľovania vonkajšieho prostredia vozidla a signalizáciu sa prispôbujú novým požiadavkám zameraným na estetické a dizajnové nároky, ochranu životného prostredia, životnosť zdrojov ako aj minimalizovanie nákladov na výrobu a vývoj. Dôraz je v súčasnosti kladený na zvýšenie aktívnej a pasívnej bezpečnosti, a teda na dva základy vonkajšieho automobilového osvetlenia – vidieť a byť vidieť. Trendom vo vývoji zdrojov optického žiarenia vo viditeľnej oblasti spektra je priblížiť sa vlastnostiam a parametrom svetla denného, ktoré vytvára vhodné podmienky pre ľudskú zrakovú sústavu. Cieľom je vytvoriť také osvetlenie, ktoré by pre danú situáciu dokázalo poskytnúť maximálne možné svetelné podmienky v rámci predpisov príslušných platných zákonov [1].

Zo štatistík Slovenskej republiky za rok 2013 bolo pri dopravných nehodách spôsobených automobilovou dopravou usmrtených 222 chodcov, z toho 156 chodcov (to je približne 70 %) bolo usmrtených v nočných hodinách pri zníženej viditeľnosti na vozovke [2].

## 1.1 Priamo emitujúce svetelné žiarenie

LED (Light Emitting Diode) je polovodičová elektronická súčiastka, ktorá vyžaruje úzko spektrálne svetlo, keď ňou prechádza elektrický prúd v priepustnom smere. V súčasnosti zaznamenáva táto technológia dynamický rast hlavne z dôvodu efektívneho využívania elektrickej energie, dlhej životnosti, ekologickosti a vysokej svietivosti.



Obrázok 1.1: Konštrukčné riešenie svetlometu AUDI A8 vybavené LED technológiou [3].

Pre osvetlenie vnútorného alebo vonkajšieho priestoru automobilu sa zvyčajne používa kombinácia niekoľkých LED pre vytvorenie dizajnového zaujímavého konceptu, ktorý vytvára charakteristickú črtu automobilu (napr. BMW – tzv. Angel Eye). Medzi ďalšiu výhodu LED patrí nábeh do plného svetelného výkonu, ktorý je rádovo v jednotkách milisekúnd. Pre porovnanie potrebuje štandardná žiarovka približne 200 ms oproti tomu LED používaná v automobilovom priemysle iba 3 ms. Zároveň sa nízka spotreba elektrickej energie prejavuje na nižšej spotrebe paliva vozidla, čo vedie k ochrane životného prostredia a šetreniu vyčerpatelných zdrojov energie. Hlavnou výhodou ich použitia v motorových vozidlách je to, že produkujú viac svetla na watt energie, a to cez 100 lm/W a dokážu vyžiariť svetlo v požadovanej farbe bez nutnosti použitia farebných filtrov. Konštrukcia je vysoko odolná voči nárazom a nedochádza k špičkovému napätiu pri zapnutí a vypnutí.

Vlnová dĺžka fotónu je závislá na jeho energii, takže s rastúcou energiou bude mať fotón menšiu vlnovú dĺžku. Súčasne sa priamoúmerne mení veľkosť prahového napätia v závislosti na rastúcej šírke zakázaného pásma. Tieto závislosti sú vyjadrené vzťahom 1.1.

$$E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda} = e \cdot U \quad (1.1)$$

Vhodnou dotáciou môžeme ovplyvniť vlnovú dĺžku emitovaného svetla, ktorá je závislá na použitom polovodiči. Pri polovodičoch z kremíku *Si* a germánia *Ge* je pravdepodobnosť dosiahnutia žiarivej rekombinácie veľmi malá. Z tohto dôvodu sa používajú zlúčeniny s prvkami z tretieho a piateho stĺpca periodickej sústavy prvkov, vid' tab. 1.1 [6].

Tabuľka 1.1: *Materiály polovodičov pre výrobu LED diód.*

<b>Materiál</b>	<b>Farba svetla</b>	<b>Vlnová dĺžka [nm]</b>	<b>Napätie [V]</b>
GaAs, AlGaAs	Infračervená	> 760	< 1,9
AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP	Červená	610 - 760	1,63 - 2,03
GaAsP, AlGaInP, GaP	Oranžová	590 - 610	2,03 - 2,10
GaAsP, AlGaInP, GaP	Žltá	570 - 590	2,10 - 2,18
InGaN/GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP	Zelená	500 - 570	1,9 – 4
ZnSe, InGaN, SiC, Si	Modrá	450 - 500	2,48 - 3,7
InGaN + luminofor	Fialová	400 - 450	2,76 – 4
Dvojitá LED (červená a modrá)	Purpurová	Viac typov	2,48 – 3,7
AlN, AlGaIn, AlGaInN	Ultrafialová	< 400	3,1 - 4,4
SiC/GaN + luminofor	Biela	Celé spektrum	3,5

Biele svetlo vyžarované LED je možné dosiahnuť priamym miešaním farieb RGB alebo fosforescenciou luminoforov. Pri miešaní základných farieb RGB majú diódy spoločnú anódu alebo katódu a sú obstarané štyrmi vývodmi. Obsahujú tri nezávislé čipy (modrý, červený a zelený), ktoré sa využívajú k osvetleniu akejkoľvek inej farby pomocou spôsobu adaptívneho miešania farieb. Spôsob využitia fosforescencie luminoforov používa žltý luminofor označovaný ako YAG (chemický vzorec  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ) budený svetlom modrej diódy InGaN,

alebo trojpásmový luminofor budený žiarením ultrafialovej diódy. Luminofor do značnej miery absorbuje fotóny modrého svetla a následne emituje svetlo s nižšou energetickou úrovňou (dlhšou vlnovou dĺžkou). Výsledné spektrum bieleho svetla je potom tvorené luminiscenciou, ktorú vyžaruje čip a fosforescenciou, ktorú vyžaruje žltý luminofor, vid' obr. 2.3.

## 1.2 Organická svetlo emitujúca dióda

Organická svetlo emitujúca dióda (ďalej len OLED) na rozdiel od tradičných anorganických LED na báze komplexnej kryštalickej štruktúry používa ku generovaniu svetla organický materiál. Zároveň nie sú vyrábané na pevných podložkách, ale potrebné usporiadanie zaisťujú organické molekuly. Konštrukcia OLED je tvorená substrátom, transparentnou elektródou, jednou alebo viacerými organickými vrstvami, opačnou elektródou a puzdrom zabraňujúcim oxidácií. V momente, keď je do niektorej vrstvy privedené napätie, sú vyvolané kladné a záporné náboje, ktoré sa spájajú vo vyžarovacej vrstve, a tým produkujú svetelné žiarenie. Štruktúra a použité elektródy sú prispôbené tak, aby dochádzalo k maximálnemu stretávaciemu náboju vo vyžarovacej vrstve. Medzi najväčšou výhodou tejto technológie rozhodne patrí ich hrúbka, ktorá je iba niekoľko tisícín milimetra, pričom poskytuje brilantné svetlo. V osvetľovacej technike vozidla sa zatiaľ príliš tento typ technológie nevyužíva, okrem interiérového signalizačného osvetlenia [6].



Obrázok 1.2: *Koncept svetlometu BMW M4 2015 (Concept Iconic Lights) vybavený technológiou OLED [4].*

Implementáciu OLED technológie do automobilových svetlometov priniesol výrobca BMW vo svojom modeli M4, ktorý by sa mal začať sériovo vyrábať vo roku 2015.

Oproti technológií LED disponujúcej bodovým vyžarovaním svetla vyžarujú OLED pomerne veľkou plochou a takéto svetlo sa javí na pohľad ako extrémne homogénne. Rovnako

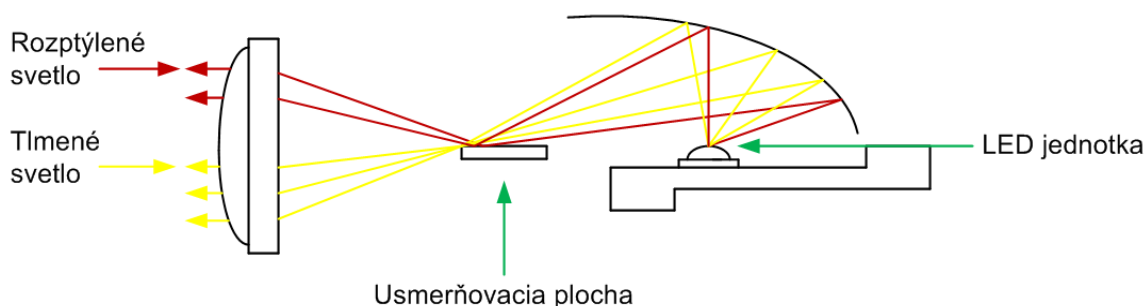


umožňujú vytvárať veľmi jasné, neobyčajné a pritom funkčné dizajnové prvky svetlometu, ktoré sa dajú ľubovoľne upravovať a tvarovať. V blízkej budúcnosti bude technológia OLED kombinovaná s LED technológiou v rámci takzvaných hybridných svetlometov.

### 1.3 Projekčné LED svetlomety

Spolu s dynamickým rozvojom LED technológie v oblasti zlepšovania svetelného výkonu, efektívneho využívania elektrickej energie, dlhej životnosti a znižovania výrobných nákladov sa otvárajú konštruktérom nové možnosti v realizácii predných svetlometov s využitím tejto technológie. Svetlomety tvorené elektroluminiscenčnými diódami ako zdrojom svetla sú posledným vývojovým trendom v oblasti osvetľovacej techniky automobilov. Prvý sériovo vyrábaný svetlomet s využitím LED technológie predstavila firma Lexus v roku 2007 na svojom vlajkovom modeli LS 600h pre funkciu tlmeného svetla. Kompletne osadenie svetlometu LED jednotkami priniesla o rok neskôr firma Audi na modely R8, kde boli obsadené všetky druhy svetiel a svietení. Tieto zdroje svetla pracujú na princípe projekčných svetlometov, viď obr. 1.3.

Pri tejto technológii klasickú clonu nahradzuje usmerňovacia plocha lúča, ktorá lúče nad vertikálnou hranicou preklopí smerom dole a zvýši tak svetelný výkon a spresní rozhranie svetla a tieňov. Napriek dlhotrvajúcemu stálemu vývoju táto technológia zatiaľ úplne nenahradila xenónové zdroje svetla, a to hlavne pri funkcií diaľkových svetlometov. Z tohto dôvodu sú sériové svetlomety vyrábané kombináciou xenónového zdroja svetla pre diaľkové svetlá a LED zdrojov pre svetlá tlmené [5].



Obrázok 1.3: Schéma projekčného svetlometu LED [5].

Ďalšou možnosťou využitia konštrukcie LED je denné osvetlenie vozidla. Charakteristickou črtou je jeho silné rozptýlenie svetelného toku, ktoré nahrádza svetelný kužeľ bežný u klasických svetlometov. Takéto rozptýlené svetlo neoslňuje protiidúcich vodičov a ani neosvetľuje vozovku, ale spĺňa dôležitú podmienku bezpečnej cestnej premávky a tou je byť videný. Denné svietenie je v súčasnej dobe štandardnou výbavou vozidiel strednej a vyššej triedy. Predpis európskeho hospodárskeho spoločenstva EHK/OSN č. 48 stanovuje prevedenie a umiestnenie svetiel pre denné svietenie a zároveň sú samotné svetlá homologizované podľa predpisu EHK/OSN č. 87.

Nespornou výhodou denného svietenia je absencia zapnutia obrysových, stretávacích a koncových svetiel vozidla v dobe svietenia denného osvetlenia vozidla. Týmto spôsobom sa

šetrí elektrická energia a životnosť použitých zdrojov svetelného žiarenia. Zapojenie je možné realizovať s využitím sústavy 12 V alebo 24 V, pričom je možné svietidlá zapojiť ako denné svetlá s funkciou pozičných svetiel automobilu, alebo výhradne k funkcií denného svietenia. Použité vysokovýkonné LED zdroje s nízkou spotrebou energie (od 4,4 W / 1 zdroj), poskytujú jasné biele svetlo s teplotou 6000 K. Svetlomety musia spĺňať príslušnú homologizáciu a dokladom oprávňujúcim používanie svetlometov k dennému svieteniu je značka *RL* vyisovaná na krycom skle svetla nad homologizačnou značkou [5].

Predpis európskeho hospodárskeho spoločenstva EHK/OSN č. 48 stanovuje základné pravidlá pre umiestnenie svetlometov pre denné svietenie DRL. Denné prevádzkové svietidlá musia byť na vozidlo kategórie M alebo N montované vo dvojici. Fotometrické vlastnosti oboch svietidiel dvojice musia byť zhodné. Orientované musia byť smerom vpred a svietiť svetlom bielej farby. Musia byť namontované tak, aby nimi vyžarované svetlo nepôsobilo rušivo na vodiča priamo alebo nepriamo, prostredníctvom spätných zrkadiel a reflexných plôch na vozidle. Umiestnené musia byť na prednej časti vozidla vo výške 250 až 1500 mm nad rovinou vozovky. Dvojica svietidiel musí byť umiestnená súmerne oproti strednej pozdĺžnej rovine vozidla, ich vzájomná vzdialenosť nesmie byť menšia ako 600 mm, prípadne 400 mm, ak je celková šírka vozidla menšia ako 1300 mm. Denné svietidlá sa musia zapínať automaticky, keď je zariadenie na štartovanie alebo vypínanie motora (pohonný systém) v polohe, ktorá umožňuje beh motora. Rovnako sa musia vypínať automaticky pri vypnutí motora alebo rozsvietení obrysových svetiel [7][8].

Dodatočná montáž svetlometov pre denné svietenie sa neklasifikuje ako prestavba vozidla ani zmena technických údajov, a preto nepodlieha schvaľovaniu ani zápisu do osvedčenia o evidencii časti I, ani v časti II.

## 2 Parametre LED používaných v automobilovom priemysle

Nároky kladené na zdroje svetla určené pre automobilový priemysel sa značne líšia od zdrojov svetla používaných v telekomunikačnej technike alebo pre osvetľovanie daného priestoru. Pri takýchto zdrojoch nie je dôležitá rýchlosť odozvy ani malá spektrálna šírka. Naopak je na svetelné zdroje používané v automobilovom priemysle kladený dôraz hneď na niekoľko parametrov, pričom každý z nich má takmer rovnakú prioritu.

Z hľadiska fotometrických veličín je dôležité používať fyzikálne jednotky a veličiny, ktoré sú zjednotené tak, že platia všade vo svete. U svetelného žiarenia sú tieto veličiny zjednotené pod záštitou Medzinárodnej komisie pre osvetľovanie CIE. Rovnako v medzinárodnej sústave jednotiek SI sa vyskytuje základná jednotka popisujúca vlastnosti svetla. Jedná sa o jednotku svietivosti, ktorá udáva priestorovú hustotu svetelného toku zdroja v rôznych smeroch. Všetky veličiny a jednotky zavedené komisiou CIE sa vzťahujú na takzvaného normálneho fotometrického pozorovateľa.

Elektrické veličiny dôležité v automobilovom priemysle sa vzťahujú k parametru nominálne napätie, nominálny prúd a z toho vyplývajúci príkon svetelného zdroja. Zároveň je z dôvodu uvoľňovania veľkého množstva energie vo forme tepla dôležitým parametrom teplotná závislosť.

Medzi ďalšie vlastnosti týkajúce sa vývoja svetelných funkcií sú dôležité konštrukčné rozmery svetelných zdrojov, ich prevádzková životnosť a v neposlednej rade cena zdroja.

Nasledujúce podkapitoly sa zameriavajú výlučne na svetelné zdrojom LED, ktoré sú osadené iba jedným P-N prechodom. V súčasnej technológii existujú aj svetelné zdroje, ktoré majú osadených niekoľko P-N prechodov na jednom čipe, a tým dosahujú vysokú svietivosť. Parametre takýchto zdrojov sa výrazne líšia od takzvaných jednočipových LED.

### 2.1 Fotometrické vlastnosti LED

Zrak človeka nie je uspokojený k tomu, aby reagoval na súhrnné pôsobenie žiarenia za určitú dobu. Pre proces videnia preto nie je dôležitá energia vyžiarená zdrojom za určitý čas, ale rozhodujúci je výkon, teda žiarivý tok zdroja a hlavne priestorové rozloženie. Pri hodnotení kvality osvetlenia sa posudzuje, do akej miery osvetlenie napomáha postupu prijatia a spracovania informácií prenášaných svetlom. Z tohto dôvodu sa v svetelnej technike neposudzujú energetické veličiny (napríklad žiarivý tok, žiarivosť a pod.), ale pracuje sa s fotometrickými veličinami, ktoré reprezentujú rôznu citlivosť oka pozorovateľa k žiareniu rôznych vlnových dĺžok [1].

#### 2.1.1 Svetelný tok

Jedná sa o svetelnú technickú veličinu, ktorá odpovedá žiarivému toku a vyjadruje schopnosť žiarivého toku spôsobiť zrakový vnem. Jednotkou svetelného toku je lumen (lm).

Svetelný tok  $\Phi$  monochromatického žiarenia vlnovej dĺžky  $\lambda$ , ktorého žiarivý tok je  $\Phi_e$  je určený vzťahom, vid' 2.1.

$$\phi(\lambda) = K(\lambda)\phi_e(\lambda) = K_m V(\lambda)\phi_e(\lambda) \quad (2.1)$$

Veličina  $K(\lambda)$  je svetelný účinok monochromatického žiarenia rovný pomeru svetelného toku a jemu odpovedajúcemu žiarivému toku. Väčšinou sa veličina  $K(\lambda)$  vyjadruje súčinom maximálnej hodnoty  $K_m$  spektrálneho priebehu veličiny  $K(\lambda)$  a pomernej svetelnej účinnosti  $V(\lambda)$  monochromatického žiarenia, vid' 2.2.

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) \quad (2.2)$$

Veličina  $V(\lambda)$  je pomerná svetelná účinnosť monochromatického žiarenia definovaná vzťahom, vid' 2.3.

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (2.3)$$

Z hľadiska individuálneho pozorovateľa je veličina  $V(\lambda)$  totožná s pomernou spektrálnou citlivosťou pozorovateľa (obvykle sa jedná o normálneho fotometrického pozorovateľa pri fotopickom videní). V sústave SI sa jednotky svetelných technických veličín odvodzujú od základnej jednotky svietivosti (1 kandela), t.j. od svietivosti zdroja žiarenia o jedinej frekvencii  $\nu = 540.10^{12}$  Hz, pri žiarivosti zdroja v danom smere  $1/683 \text{ W.sr}^{-1}$  [1].

## 2.1.2 Priestorový uhol

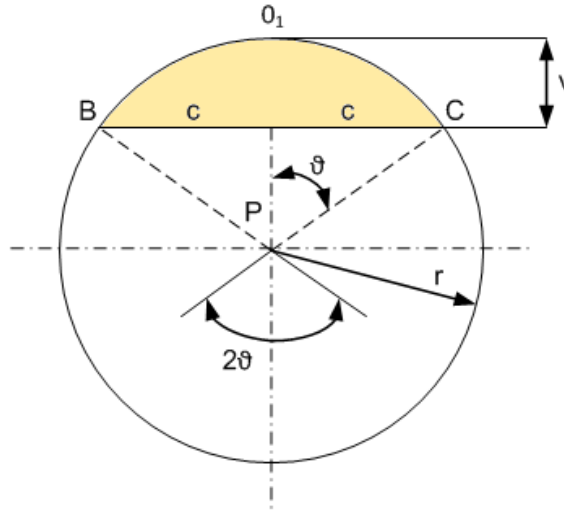
Patrí medzi dôležitú geometrickú veličinu používanú v svetelných technických výpočtoch. Jeho veľkosť je určená veľkosťou plochy vyťatej obecnou kužeľovou plochou na povrchu jednotkovej gule, ktorej stred (vrchol priestorového uhlu) je totožný s vrcholom uvažovanej kužeľovej plochy. Jednotkou priestorového uhlu je steradián (sr), určený jednotkovou plochou ( $1 \text{ m}^2$ ) na povrchu jednotkovej gule (o polomeru 1 m). Priestorový uhol  $\Omega$ , pod ktorým je zo stredu gule o polomeru  $r$  vidieť plocha  $A$  vyťatá na povrchu tejto gule je možné vyjadriť vzťahom, vid' 2.4 [9].

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.4)$$

Najväčšie hodnoty, a to  $\Omega_{max} = 4\pi$  nadobúda priestorový uhol pre plochu  $A$  rovnej povrchu celej gule, t.j.  $A = 4\pi r^2$ . Elementárna plochu  $dA$  je z bodu  $P$ , umiestnenú vo vzdialenosti  $l$ , vidieť pod priestorovým uhlom  $d\Omega$ .

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (2.5)$$

Celá plocha  $A$  je z bodu  $P$  vidieť pod priestorovým uhlom, ktorý je rovný súčtu priestorových uhlov, pod ktorými sú z bodu  $P$  vidieť jednotlivé čiastkové plochy, na ktoré sa plocha  $A$  rozdelí. Často sa rozmery čiastkových plôch  $\Delta A_i$  volia tak, aby boli prakticky zanedbateľné.



Obrázok 2.1: Stanovenie priestorového uhlu, pod ktorým sa z bodu  $P$  pozoruje kruhový zdroj.

Priestorový uhol časti povrchu gule o polomere  $r$  alebo kruhovej plochy o polomere  $c$ , vid' obr. 3.1 pozorovanej z bodu  $P$  sa zistí vzťahom, vid' 2.6.

$$\Omega = 2\pi v = 2\pi(1 - \cos \vartheta) \quad (2.6)$$

V praxi sa často počíta priestorový uhol, pod ktorým sa z určitej vzdialenosti pozoruje obdĺžniková plocha. Pozorovaný obdĺžnik BCDG leží v sústave súradníc  $x, y, z$  v rovine rovnobežnej s rovinou  $xy$  vo vzdialenosti  $h$  od začiatku  $P$  sústavy [1].

### 2.1.3 Svietivosť

Pri nerovnomernom rozložení svetelného toku zdroja do rôznych smerov priestoru je potrebné okrem hodnoty úhrnného svetelného toku poznať ešte priestorovú hustotu svetelného toku v rôznych smeroch, t.j. svietivosť zdroja. Svietivosť  $I_{\gamma\zeta}$  v smere určenom uhlami  $\gamma, \zeta$  je ako priestorová hustota vyžarovaného svetelného toku rovná svetelnému toku obsiahnutého v jednotkovom priestorovom uhle, vid' 2.7.

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad (2.7)$$

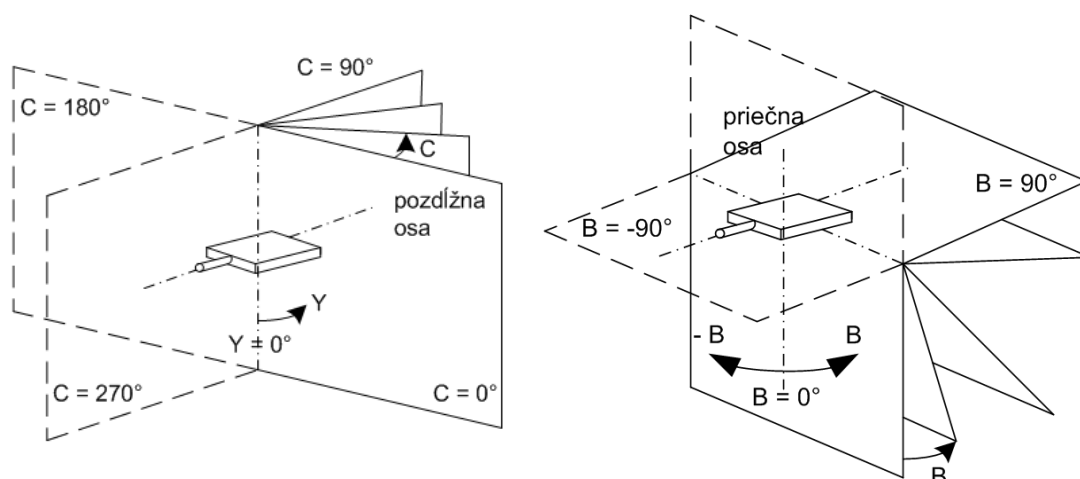
kde  $d\Omega_{\gamma\zeta}$  je priestorový uhol, ktorého os leží v smere určenom uhlami  $\gamma, \zeta$  a v jeho rozmedziach uvažovaný zdroj vyžaruje tok  $d\Phi$ .

Svietivosť sa stanovuje pre zdroj, ležiaci na vrchole priestorového uhlu  $d\Omega_{\gamma\zeta}$ , teda teoreticky v jednom bode. Preto je svietivosť definovaná iba pre bodový zdroj, t.j. pre taký zdroj, ktorého vyžarovacia plocha má rozmery zanedbateľné v porovnaní so vzdialenosťou

kontrolného bodu od vrcholu priestorového uhlu  $d\Omega_{\gamma\zeta}$ . Vyžarovacia plocha takéhoto zdroja je sústredená do spomínaného vrcholu priestorového uhla, teda do bodu, ktorý predstavuje svetelný stred uvažovaného bodového zdroja.

Jednotkou svietivosti je kandela (cd), ktorá patrí medzi základné jednotky sústavy SI. Podľa uznesenia 16. Generálnej konferencie z roku 1979 sa jedna kandela rovná svietivosti zdroja, ktorý vyžaruje v určitom smere monochromatické žiarenie o frekvencii  $540.10^{12}$  Hz, pričom žiarivosť zdroja v tomto smere je  $1/683 \text{ W.sr}^{-1}$ . Ak sa zistia hodnoty svietivosti zdroja vo všetkých smeroch priestoru a nanesú sa priestorovo od svetelného streda zdroja ako rádius vektory, dostane sa spojením všetkých koncových bodov týchto vektorov fotometrická plocha svietivosti. Je potrebné poznať iba niektoré rezy touto plochou, a to rovinami prechádzajúcimi bodovým zdrojom. V rovinách rezu tak vzniknú čiary (krivky) svietivosti v polárnych súradniciach [1].

Čiary svietivosti sa obvykle udávajú v určitých rovinách vybraných z niektorého z troch typov zväzkov rôznobežných rovín, ktorých priesečnice (osy zväzku) prechádzajú svetelným stredom zdroja. Na obr. 2.2 sú znázornené sústavy fotometrických rovín (respektíve polrovín)  $C - \gamma$ ,  $B - \beta$ , doporučených Medzinárodnou komisiou pre osvetľovanie CIE [9].



Obrázok 2.2: Sústava fotometrických rovín  $C - \gamma$  a  $B - \beta$ .

Aby krivky svietivosti zdrojov udávané v katalógoch boli nezávislé na skutočnom svetelnom toku použitých zdrojov svetla, prepočítavajú sa diagramy svietivosti na svetelný tok zdroja 1000 lm. Skutočná svietivosť  $I_{\gamma}$  zdroja, ktorého tok je  $\Phi_z$ , sa určí vynásobením svietivosti  $I'_{\gamma}$  prečítanej z diagramu svietivosti pre 1000 lm pomerom  $\Phi_z/1000$ .

#### 2.1.4 Intenzita osvetlenia

Osvetlenie (intenzita osvetlenia)  $E$  rovinnej plochy  $dA$ , t.j. plošná hustota svetelného toku  $d\Phi_d$  dopadajúceho na plochu  $dA$ , je určená vzťahom, viď 2.8.

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (2.8)$$

Intenzita osvetlenia plochy  $dA$  sa často označuje ako osvetlenie v bode, ktorého elementárne okolie v uvažovanej rovine tvorí plochu  $dA$ . Jednotkou intenzity osvetlenia je lux (lx).

### 2.1.5 Jas

Ide o svetelne technickú veličinu, na ktorú bezprostredne reaguje zrakový orgán. Táto veličina je obecné určená priestorovou a plošnou hustotou svetelného toku prenášaného lúčom, vid' vzťah 2.9. Jednotkou jasu je kandela na štvorcový meter ( $\text{cd.m}^{-2}$ ), skôr označovaná tiež ako *nit* (nt).

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_n} \quad (2.9)$$

Prostredie v ktorom je vyžarované, pohlcované alebo rozptyľované svetlo, sa mení svetelný tok prenášaný zväzkom svetelných lúčov od bodu k bodu a zároveň sa úmerne so zmenou svetelného toku mení aj jas zväzku lúčov. V prípade, že vymedzíme zväzok lúčov dvoma otvormi o veľkosti plochy  $dA_1$  a  $dA_2$  v ľubovoľne umiestnených tienidlách  $A_1$  a  $A_2$ , a sú rozmery otvorov  $dA_1$  a  $dA_2$  zanedbateľné v porovnaní so vzdialenosťou  $l$  medzi tienidlami  $A_1$  a  $A_2$ , vyplývajú z tejto rovnice platné vzťahy.

Pre jas  $L_{OP}$  zväzkov lúčov zbíhajúcich v priestorovom uhle  $d\Omega_1 = dA_1 \cos\gamma l^2$  z plochy  $dA_1$  do bodu  $P$  platí vzťah 2.10. Tento vzťah sa používa k určeniu jasu zdroja v smere oka pozorovateľa, poprípade k zisteniu jasu neprístupných zdrojov alebo zdrojov, ktorých rozmery nie sú známe.

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_2 \cos\beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad (2.10)$$

Pre jas  $L_{OP} = L_\gamma$  zväzkov paprskov rozbiehajúcich sa v priestorovom uhle  $d\Omega_2 = dA_2 \cos\beta l^2$  z bodu  $O$  platí vzťah 2.11.

$$L_{OP} = L_\gamma = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 dA_1 \cos\gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cos\gamma} \quad (2.11)$$

V homogénnom, nerozptyľujúcom a nepohlcujúcom prostredí je jas zväzku svetelných lúčov na jeho dráhe všade rovnaký, a teda nezávislý na vzdialenosti od zdroja svetla. Tento prípad umožňuje zjednodušenie a namiesto s jasom zväzku lúčov sa pracuje s jasom svietiacej plochy zdroja [1].

### 2.1.6 Svetelnotechnické vlastnosti materiálu

Optické vlastnosti materiálu sú dôležité pri návrhu a konštrukcii svetelne činných častí zariadení s ohľadom na usmernenie svetelného toku, jeho rozptylu a poprípade obmedzenie jasu v určitých smeroch, a to pri zachovaní čo najväčšej účinnosti.

Svetelný tok  $\Phi$  dopadajúci na uvažovaný materiál sa v obecnom prípade delí na tri časti, a to na časť  $\Phi_p$ , ktorá odráža, na časť  $\Phi_\tau$ , ktorá látkou prejde, a na časť  $\Phi_a$ , ktorú látka pohltí, vid' vzťah 2.12.

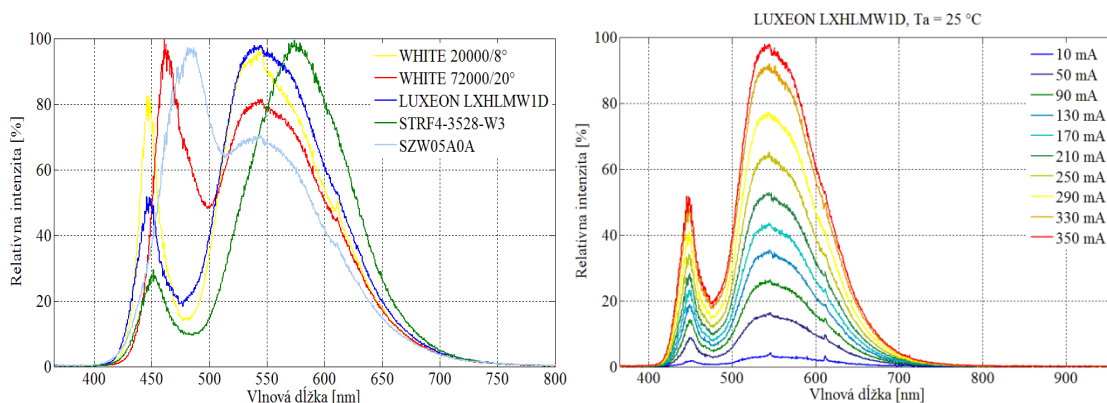
$$\Phi = \Phi_p + \Phi_\tau + \Phi_a \quad (2.12)$$

Činitele odrazu, prestupu a pohltienia nezávisia iba na vlastnostiach látky samotnej, ale aj na vlnovej dĺžke dopadajúceho žiarenia. Z tohto dôvodu sa okrem integrálnych hodnôt činiteľov definujú aj ich spektrálne hodnoty  $p(\lambda)$ ,  $\tau(\lambda)$  a  $\alpha(\lambda)$  [1].

### 2.1.7 Teplota svetla

Teplota svetla je opísaná čiarou teplotného žiariča, ktorá zodpovedá žiareniu absolútne čierneho telesa pri rôznych teplotách. Takáto teplota sa určuje iba pre spektrum bieleho svetla.

Výrobcovia v súčasnosti ponúkajú široký výber LED, ktoré sú určené pre použitie v automobilovom priemysle. Tento trh pokrýva celý rozsah normami stanovených použiteľných teplôt svetla v interiéri a exteriéri automobilu. Veľmi často sú LED rozdeľované výrobcom na studené (cool) 4500 – 10 000 K, neutrálne (neutral) 3500 – 4500 K a teplé (warm) 2540 – 3500 K. Klasifikácia týchto zdrojov sa líši vzhľadom ku konkrétnemu výrobcovi.



Obrázok 2.3: *Spektrum bieleho svetla pre jednotlivé typy LED (cool, neutral, warm) [6].*

Svetelné zdroje produkujúce teplé biele svetlo majú farebné podanie svetla podobné viac žltej farbe, ktorú ponúkajú klasické žiarovky. Naopak studené biele svetlo ponúka farbu podobnú skôr modrému svetlu. Táto zmena farebného podania u LED zdrojov je založená na hrúbke vrstvy použitého luminoforu. Na základe hrúbky vrstvy použitého luminoforu sa mení zloženie vyžarovaného spektra, vid' obr. 2.3.

Spektrum bieleho svetla LED ovplyvňujú dve dominantné farby (v prípade, že sa nejedná o adaptívne miešanie farieb RGB LED). Vlastný čip diódy vyžaruje na vlnovej dĺžke v okolí 450 nm, čo je oblasť modrého svetla (vlastné svetlo diódy) a v rozmedzí 550 – 600 nm sa nachádza oblasť fosforescencie reprezentovaná vrstvou luminoforu. Luminofor do značnej miery absorbuje fotóny modrého svetla a následne emituje svetlo s nižšou energetickou hladinou (dlhšou vlnovou dĺžkou). Teplejšie biele LED majú potlačenú oblasť spektra v oblasti



modrého čipu a dominantnú v oblasti fosforescencie. Naopak studené LED majú potlačenú oblasť fosforescencie a dominantnú oblasť spektra v oblasti modrého čipu.

## 2.2 Elektrické vlastnosti LED

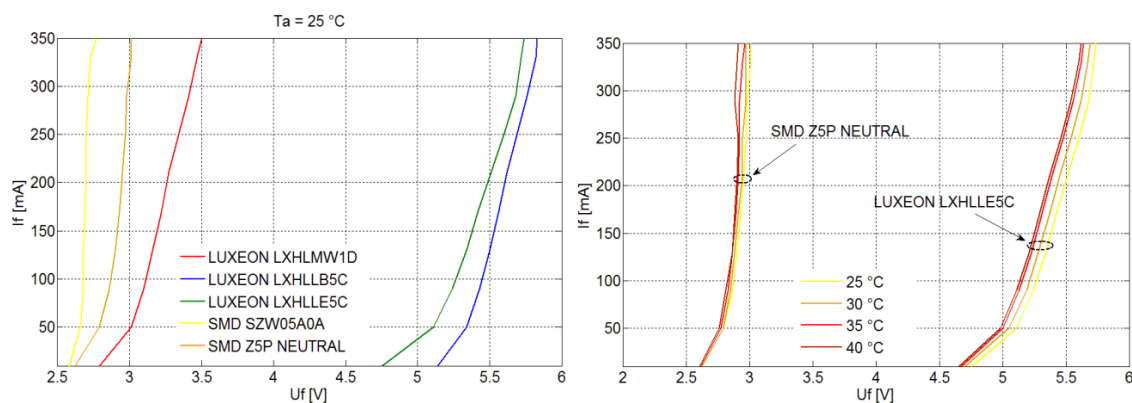
Medzi hlavné prednosti LED používaných v automobiloch je ich nízka spotreba elektrickej energie a s tým spojená nižšia spotreba paliva vozidla. Typicky sú biele LED výrobcami konštruované pre napätie 3,0–3,5 V. Nespornou výhodou ich použitia v motorových vozidlách je rovnako aj to, že produkujú viac svetla na watt energie, a to cez 100 lm/W.

Výrobcovia obvykle neuvádzajú v katalógových listoch presne stanovené hodnoty elektrického prúdu pre konkrétnu LED, ale uvádzajú hodnotu nominálneho elektrického prúdu, pri ktorom svoje LED testujú a na základe tohto prúdu určujú ich optické vlastnosti.

### 2.2.1 Volt-Ampérová charakteristika

Volt-Ampérová charakteristika, ktorá je niekedy označovaná ako VI charakteristika, popisuje závislosť napätia  $U_F$  LED na pretekajúcom prúde  $I_F$  LED. Priebeh charakteristiky ovplyvňujú jednotlivé typy LED, geometria, vlastnosti P-N prechodov, použité materiály, výrobná technológia, atď. Priebeh v zápornom napätí sa označuje ako záporná oblasť a preteká v nej zanedbateľný prúd. V určitých hodnotách záporného napätia  $U_{BR}$  môže ale dôjsť k prerazeniu diódy a následne k jej deštrukcii. Oblasť s kladným napätím je označovaná ako priepustná oblasť a v tejto oblasti začína dióda viesť napätie od hodnôt prahového napätia  $U_D$ . V tomto smere má dióda nenulový odpor a s rastúcim napätím sa zahrieva [10].

Pri zahrievaní LED dochádza k zmene jej VI charakteristiky, pričom zvyšovanie teploty na čipe alebo v jeho okolí spôsobuje takmer lineárny pokles napätia, vid' obr. 2.4 zobrazujúci citlivosť LED voči teplotnej zmene okolia v rozmedzí  $T_a = 25 - 40$  °C.



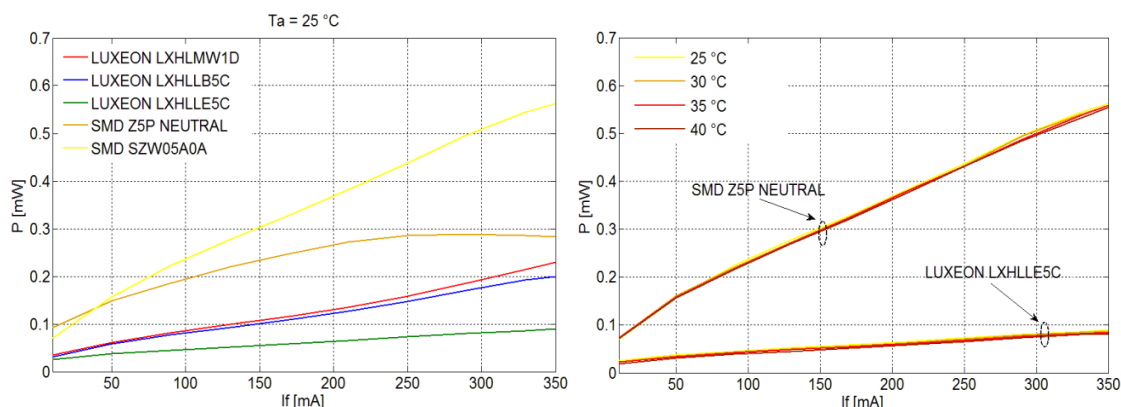
Obrázok 2.4: Volt-Ampérová charakteristika LED a ich závislosť na zmene teploty okolia [6].

### 2.2.2 Prevodová charakteristika

Prevodová charakteristika, ktorá je tiež označovaná ako PI charakteristika, popisuje závislosť optického výkonu  $P$  na pretekajúcom prúde  $I_F$  LED. Nárast pretekajúceho elektrického prúdu ovplyvňuje optický výkon, ktorý však rastie na úkor životnosti LED, vyššej

spotreby energie a zvyšujúcich sa nárokov na chladenie samotnej LED. Naopak pri poklese pretekajúceho elektrického prúdu dochádza k poklesu optického výkonu, čo vedie k nutnosti použitia sústavy LED pre dosiahnutie určitého svetelného toku. Tento fakt ale vedie k zvyšovaniu nákladov pre konkrétnu aplikáciu a k nutnosti použitia riadiacej elektroniky [10].

Pri zahrievaní LED je ovplyvňovaná aj jej PI charakteristika, pričom zvyšovanie teploty na čípe alebo v jeho okolí spôsobuje, že optický výkon v závislosti od zvyšujúcej sa teploty takmer lineárne klesá, viď obr. 2.5 zobrazujúci citlivosť LED voči teplotnej zmene okolia v rozmedzí  $T_a = 25 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



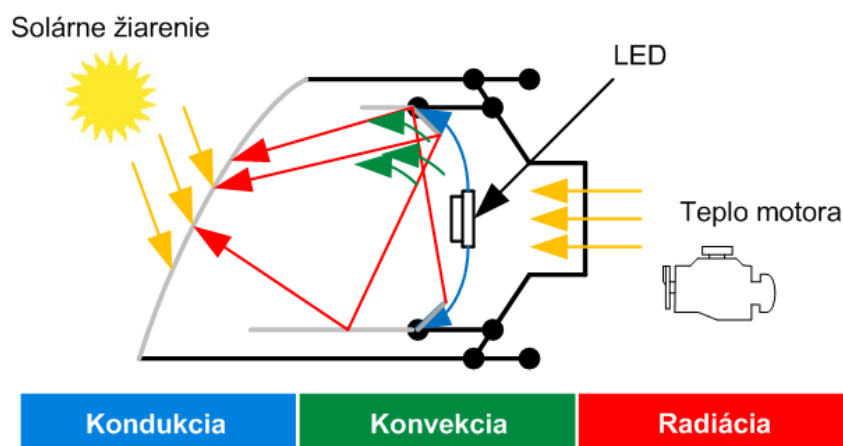
Obrázok 2.5: Prevodová charakteristika LED a ich závislosť na zmene teploty okolia [6].

### 2.2.3 Teplotná závislosť

Svetlomety v automobilovom priemysle v súčasnosti bežne obsahujú LED čipy s účinnosťou 150 – 250 lm/chip (tlmené, diaľkové svetlá), pri ktorých dochádza k uvoľňovaniu určitého množstva energie vo forme tepla. V takomto prípade dochádza k poklesu životnosti, svietivosti a prípadne aj k deštrukcii čipu.

Svetelný zdroj nie je posudzovaný v oblasti kvality iba podľa životnosti, ale rovnako je dôležitá aj stálosť svetelného toku. Pri LED zdrojoch dochádza k lineárnemu poklesu svietivosti v závislosti so zvyšujúcou sa teplotou.

Okolie svetlometu výrazne ovplyvňuje teplota, ktorá značne kolíše podľa podmienok, v ktorých sa automobil pohybuje. V zimných mesiacoch teplota klesá pod  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v priebehu letných mesiacov presahuje hranicu  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Svetlomet môže byť zahrievaný solárnou radiáciou spôsobenou priamym slnečným žiarením až k teplotám  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ďalším ovplyvňujúcim faktorom je motor vozidla, ktorý sa vo väčšine prípadov nachádza v tesnej blízkosti svetlometu. Pri veľkom zaťažení motora môže dochádzať k zahrievaniu okolia svetlometu. Výrobcovia väčšinou testujú svetlomety pri okolitej teplote  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pri zapnutí všetkých funkcií svietenia. Postup testovania a jeho priebeh sa líši vzhľadom ku konkrétnemu výrobcovi. Každý svetlomet je teda limitovaný maximálnou prístupnou teplotou jednotlivých častí a tento fakt sa pri návrhu svetlometu nemôže zanedbať. Proces zaoberajúci sa návrhom svetlometu po tepelnej stránke sa označuje ako thermal management.



Obrázok 2.6: *Zdroje a typy šírenia tepla v svetlomete.*

Kondukcia označuje typ šírenia tepla, ktoré je viazané na hmotu a prebieha len medzi tesne susediacimi časticami. Prenos tepelnej energie prebieha prostredníctvom zrážiek molekúl s kinetickou energiou. Tento typ šírenia sa objavuje v pevných, plynných a kvapalných látkach. V svetlomete automobilu sa objavuje kondukcia hlavne zo zdroja čipu LED do podložky a následne chladiča, ktorý teplo odvádza, vid' obr. 2.6.

Konvekcia označuje prenos tepla prúdením vplyvom tepelnej energie pohybujúcimi sa časticami v priestore. Tieto častice sa premiestňujú v priestore prirodzeným alebo núteným prúdením. K prirodzenej konvekcii dochádza v dôsledku vplyvu rozdielných teplôt. S týmto druhom konvekcie sa môžeme stretnúť u pasívne chladených svetlometov, kde nie je prúdenie vzduchu umelo podporované. Nútená konvekcia vzniká cieľeným umelým zásahom do chladenia svetlometu (ventilátor, čerpadlo). Pomerne bežná je u aktívne chladených svetlometov, pri ktorých je chladič ochladzovaný prúdom vzduchu [12].

Radiácia je tepelné žiarenie vo forme elektromagnetického vlnenia v určitom spektre vlnových dĺžok. Fotóny vyžaruje každé teleso, ktorého teplota je vyššia ako 0 K, pričom takéto nosiče energie nie sú viazané na hmotné prostredie. Tento fakt z radiácie robí najrýchlejší druh prenosu tepla. K najintenzívnejšiemu vyžarovaniu dochádza v okolí LED čipu, vid' obr. 2.6.

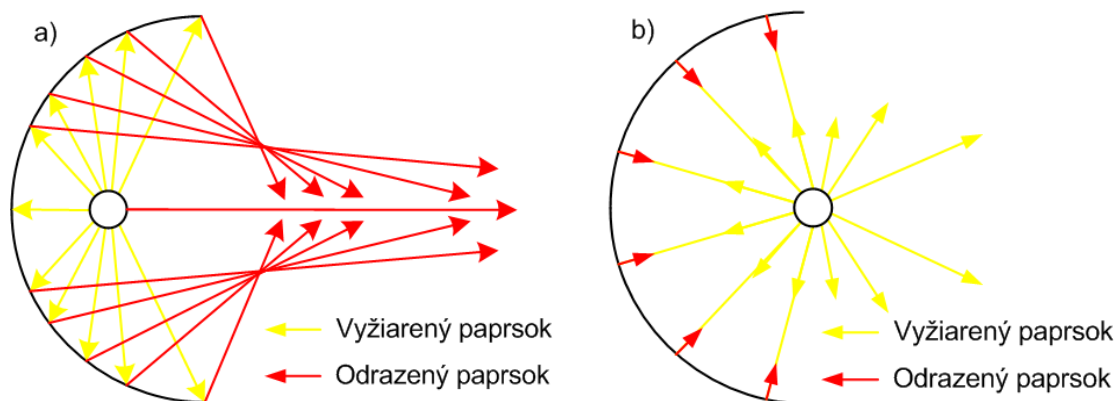
### 3 Aplikácie LED používané v automobilovom priemysle

Dôležitou časťou LED svetidla z hľadiska tvorby svetelných funkcií sú použité svetelné činné časti. Tieto časti upravujú rozloženie svetelného toku vyžarovaného zdrojom a určujú fotometrické vlastnosti svetidla. Svetelné činné časti môžu svetelný tok rovnomerne rozptýliť alebo usmerniť do určeného svetelného zväzku. Nasledujúce podkapitoly sú venované najpoužívanejším aplikáciám tvorby svetelných funkcií v automobilovom priemysle.

#### 3.1 Reflektory

Reflektory sú svetelne činné časti svetidiel, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku s využitím svetelného odrazu. Kvalita materiálu reflektoru ovplyvňuje účinnosť svetidla a rovnako aj spektrálne zloženie odrazeného svetla. V súčasnosti sú reflektory vyrábané z nízkonákladového plastu, ktorý je pokrytý vrstvou reflexného materiálu (hliník alebo striebro). Použitie plastu ako základného materiálu je ale limitované maximálnou teplotou. Najpoužívanejšou technikou mechanickej ochrany povrchu u reflektorov je eloxovanie. Goniometrický tvar, veľkosť svetelného zdroja a tvar zrkadlového reflektoru stanovujú, akým spôsobom sa bude odrážať svetlo od povrchu reflektoru a aký bude charakter vyžarovaného svetla [1].

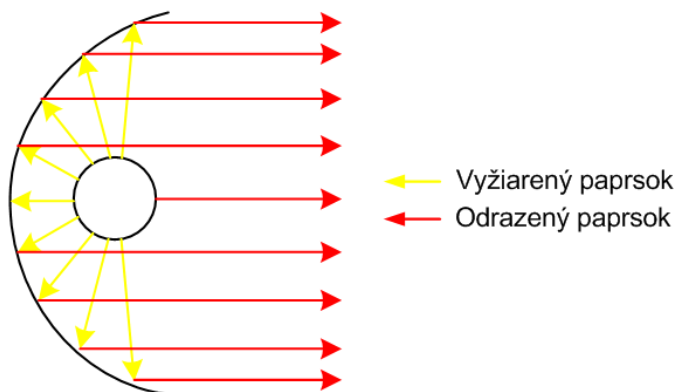
Medzi základné tvary reflektorov patrí guľový, eliptický a parabolický. V prípade guľového reflektoru s bodovým svetelným zdrojom, ktorý sa nachádza v optickom strede svetelnej sústavy sa časť lúča dopadajúceho na povrch reflektoru v blízkosti jeho osy odrazí takmer paralelne s touto osou. Na obr. 3.1a sú znázornené smery dráh lúčov, ktoré sa neodrazia paralelne s osou v prípade guľového reflektoru.



Obrázok 3.1: Guľový reflektor so svetelným zdrojom umiestneným mimo geometrický stred reflektoru a v geometrickom strede reflektoru.

Ak by bol svetelný zdroj umiestnený v geometrickom strede guľového reflektoru, tak by sa lúče odrazené od povrchu reflektoru vracali späť do polohy svetelného zdroja, viď obr. 3.1b. Použitie guľových reflektorov v automobilovom priemysle nie je nijak výrazné a častejšie sa

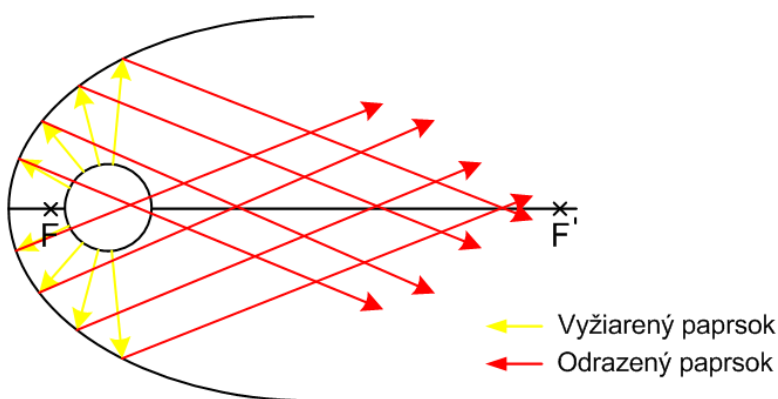
v svietidlách používajú parabolické reflektory, ktoré odrážajú svetelné lúče svetelného zdroja umiestneného v ohnisku rovnobežne, pričom vytvárajú paralelný zväzok, vid' obr. 3.2. Pri parabolických reflektoroch je veľké množstvo priameho svetelného toku pochádzajúceho zo svetelného zdroja vyžarované mimo hlavný zväzok lúčov.



Obrázok 3.2: *Parabolický reflektor.*

Parabolické reflektory sa využívajú často v prevedení spolu s fazetami. Fazetové reflektory sú konštruované z množstva malých plôch (faziet), ktoré na seba vzájomne nadväzujú. Pri parabolických reflektoroch je veľké množstvo svetelného toku pochádzajúceho zo svetelného zdroja vyžiarené mimo hlavný svetelný zväzok. Takéto svetlo môže spôsobovať oslnenie, a preto sa využíva v kombinácii so spätným reflektorom [1].

Posledným typom reflektoru, ktorý je často používaný v automobilovom priemysle je elipsoidný reflektor. Tento typ reflektoru s bodovým zdrojom umiestneným v prvom ohnisku vedie odrazené svetelné lúče druhým ohniskom reflektoru, vid' obr. 3.3. Dôraz je tu kladený na umiestnenie svetelného zdroja, kedy jeho posunutie spôsobí zmenu smeru odrazených lúčov [1].



Obrázok 3.3: *Elipsoidný reflektor.*

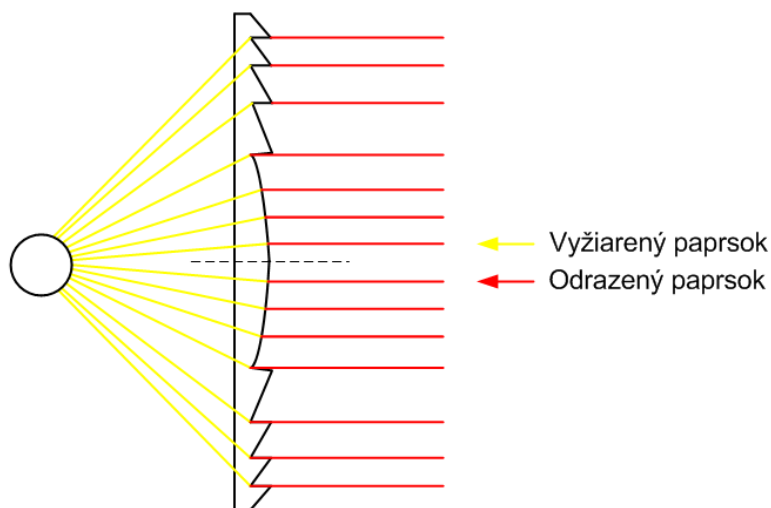
Popri jednoduchých reflektoroch je možné využiť aj reflektory kombinované, ktoré vznikajú kombináciou viacerých druhov reflektorov v jednom zariadení.

### 3.2 Šošovky

Optické šošovky sú v súčasnosti používané veľmi často pri vývoji svetelných funkcií v automobilovom priemysle. Šošovka mení priestorové rozloženie svetelného toku za pomoci lomu svetelných lúčov. Svetelná účinnosť šošoviek je závislá na pohltení svetla v celej šírke šošovky, odrazu svetla na vonkajšej strane a odrazu svetla na vnútornej strane. Najrozšírenejšie optické šošovky pre LED zdroje vytvárajú rotačne symetrickú plochu svietivosti, kde je svetelný tok koncentrovaný do užšieho svetelného zväzku.

Nedokonalosť šošoviek je spojená s deformáciou svetla a tzv. chromatickou aberáciou (farebnou chybou). Táto chyba sa odvíja od závislosti indexu lomu na vlnovej dĺžke svetla. Svetlo bielej LED používanej v automobilovom priemysle sa skladá z dvoch vlnových dĺžok (oblasť luminiscencie a fosforescencie), ktoré sa pri prechode optickou šošovkou lámu inak. Výsledkom takéhoto šírenia je mierna odlišnosť farby v okrajovej a stredovej časti svetla.

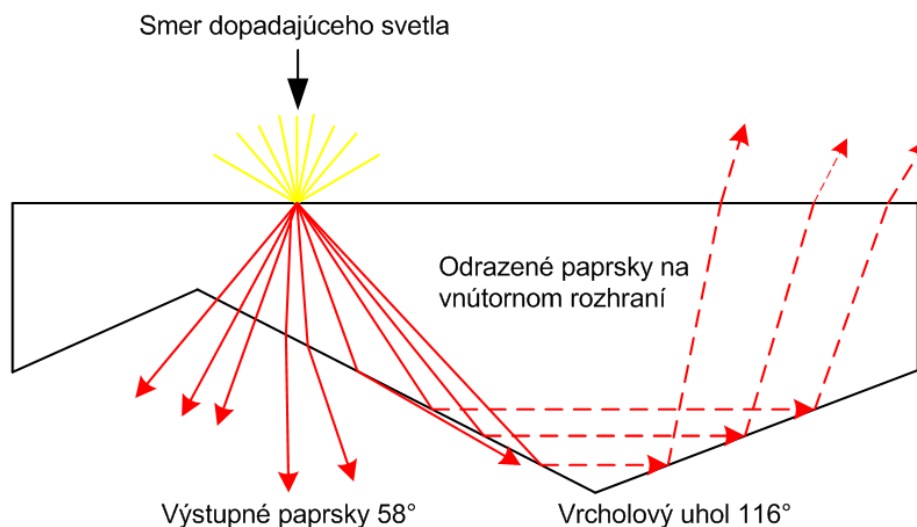
Pre použitie v automobilovom priemysle sú využívané Fresnelové šošovky. Od klasických šošoviek sa líšia menšou hrúbkou a nižšou hmotnosťou z dôvodu odstránenia častí, ktoré nerealizujú lom lúčov svetla. Fresnelové šošovky menia smer lúčov šíriacich sa od bodového zdroja svetla na rovnomerne sa šíriace lúče, vid' obr. 3.4 [1].



Obrázok 3.4: Princíp funkcie Fresnelovej šošovky.

### 3.3 Refraktory

Refraktory sa radia medzi optické prvky, ktoré menia rozloženie svetelného toku s využitím lomu svetelných lúčov. Ich hlavným znakom je vysoká hodnota činiteľa prestupu (až 85 %) a veľký rozsah možných úprav výslednej krivky svietivosti zdroja. Okrem lomu svetla sa u reflektorov využíva aj úplný vnútorný odraz. Tento odraz vzniká v prípade, kedy svetelný lúč dopadá na vnútornú stranu materiálu pod uhlom, ktorý je väčší ako medzný uhol. V takomto prípade paprsok nepreniká mimo, ale odrazí sa späť do materiálu, vid' obr. 3.5, ktorý popisuje dopad lúča pod medzným uhlom a uhlom väčším, akým je medzný uhol. Medzný uhol je závislý od materiálu, z ktorého je reflektor vyrobený [1].

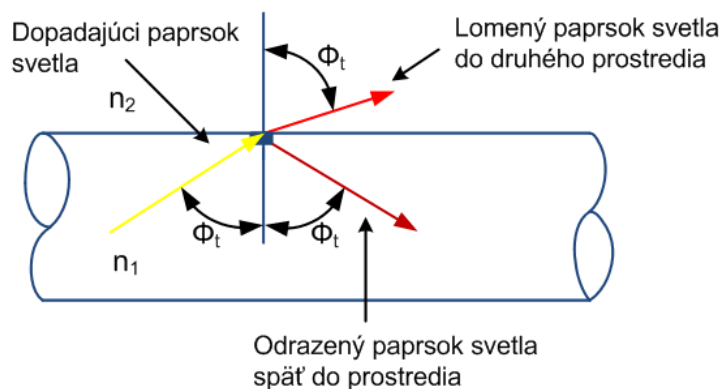


Obrázok 3.5: *Princíp funkcie refraktoru.*

Refraktory sú v aplikáciách pre automobilový priemysel často kombinované s inými optickými súčiastkami, akými sú napríklad šošovka alebo kolimátor. S ich využitím je možné vytvoriť zaujímavé optické prvky automobilov, ktoré zároveň plnia aj dizajnovú funkciu svetidla.

### 3.4 Svetlovody

Svetlovody sú v súčasnosti často používaným optickým prvkom využívaným v exteriérovom alebo interiérovom osvetlení vozidla, kde je potrebné svetlo rozložiť tak, aby zvýraznilo dôležité dizajnové prvky vozidla. Svetlovod je optické zariadenie, ktoré sa používa k vedeniu svetla naviazaného zo svetelného zdroja k bodu alebo sústave bodov s minimálnou stratou energie, pričom je toto vedenie svetla založené na princípe totálneho odrazu [14].



Obrázok 3.6: *Princíp odrazu a lomu lúča v prostredí svetlovodu.*

Základný materiál pre výrobu svetlovodu v automobilovom priemysle je číry plast. Ako zdroj svetla pre naviazanie do svetlovodu sa najčastejšie používa dióda LED. Ich výhodou sú malé rozmery a smerová výstupná charakteristika, ktorá umožňuje účinnejšie naviazanie svetla

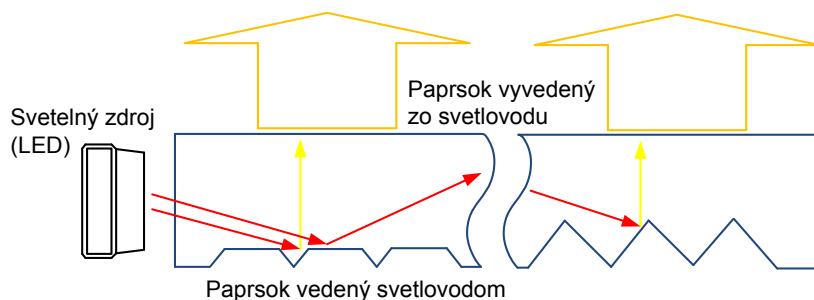
do svetlovodu. Rovnako je dôležitá aj ich teplotná stálosť v smere žiarenia a s tým spojené použitie tepelného filtra.

Totálny odraz vzniká na rozhraní dvoch prostredí s odlišnou hodnotou indexu lomu. Ak sa šíri lúč svetla pod uhlom  $\Phi_i$ , ktorý je väčší ako kritický uhol  $\Phi_c$  z opticky hustejšieho prostredia, nastáva na rozhraní totálny odraz (t.j. energia svetelného lúča sa so 100 % účinnosťou vracia späť do pôvodného, opticky hustejšieho prostredia). Hodnota kritického uhlu  $\Phi_c$  je daná rovnicou, vid' 3.1.

$$\Phi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.1)$$

kde  $n_1$  je hodnota indexu lomu prvého, opticky hustejšieho prostredia,  $n_2$  je hodnota indexu lomu druhého, opticky redšieho prostredia. V prípade svetlovodov určených pre použitie v automobilovom priemysle sa hodnota indexu lomu pre väčšinu materiálov pohybuje okolo hodnoty 1,5 a svetlovod je obklopený vzduchom o hodnote indexu lomu 1,00026 [14].

Svetlo je šírené pozdĺž optických osí svetlovodu s využitím totálneho odrazu, kde pri porušení podmienok totálneho odrazu dochádza k vyviazaniu svetla von zo svetlovodu. Porušenie podmienky totálneho odrazu a vyviazania svetla zo svetlovodu sa realizuje za pomoci použitia zubov alebo vrypov. Vhodné umiestnenie sústavy zubov a vrypov ma za následok homogénny vzhľad celého svetlometu. Takáto sústava je pritom navrhnutá tak, aby sme svetla vyviazaného zo svetlometu bol presne vymedzený. Medzi hlavné faktory ovplyvňujúce fotometrický výstup svetlovodu patrí tvar sústavy vyvážujúcich zubov a uhol, ktorý zvierá zub s pozdĺžnou osou svetlovodu, tvar prierezu svetlovodu a správna voľba umiestnenia svetelného zdroja, t.j. na ktorý koniec je zdroj umiestnený.



Obrázok 3.7: Typická konštrukcia zubov používaných na začiatku a konci svetlovodu [11].



## 4 Svetlomet Jaguar XK

Svetlomet určený pre vozidlo Jaguar XK bol skonštruovaný firmou Varroc Lighting Systems s.r.o. pre model 2011. Tento HID (High Intensity Discharge) bi – xenónový svetlomet využíva projekčnú funkciu AFS (Adaptive Front – lighting Systems).



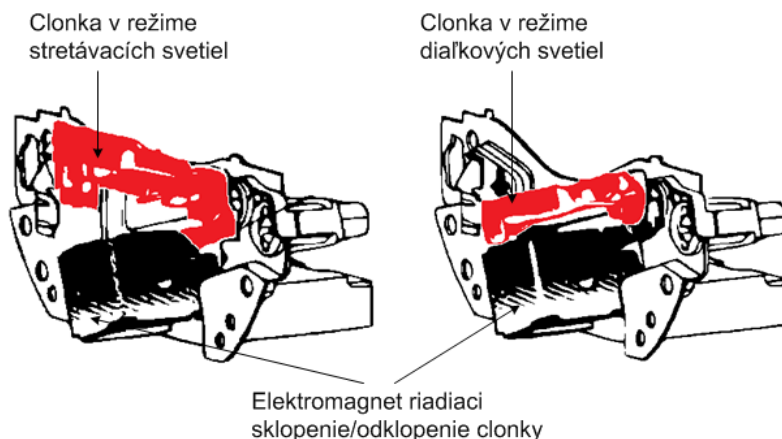
Obrázok 4.1: Svetlomet vozidla Jaguar XK navrhnutý a skonštruovaný firmou Varroc Lighting Systems s.r.o.

Adaptívne svetlomety (AFS) predstavujú kompletné riešenie, ktoré ponúka automatické prispôbovanie natočenia svetlometu založené na okamžitých podmienkach v premávke. Princíp spočíva vo vybavení vozidla riadiacou elektronickou jednotkou, ktorá má za úlohu zhromažďovať a vyhodnocovať signály od senzorov (senzor vnútorného osvetlenia, rýchlosti, uhla natočenia volantu, zapnutých smerových svetiel atď.) a riadiť zapínanie, vypínanie a natáčanie svetlometov. Tieto modifikácie sú založené na dynamickej regulácii nastavenia sklonu svetlometov, ktorá zabezpečuje stabilnú svetelnú stopu pri prejazde cez nerovnosti, alebo pri akcelerácii a brzdení.

Riadiaca elektronika AFS sa stará o nastavenie optimálneho svetelného výkonu a tvaru svetelných kužeľov s využitím dvoch krokových elektromotorov, ktoré pohybujú modulom o  $\pm 6^\circ$  vo vertikálnej ose a  $\pm 17^\circ$  v horizontálnej osi.

Bi – funkčný mechanizmus je systém, ktorý umožňuje použitie jedného projektoru pre svietenie v režime stretávacích svetiel (Low Beam – LB) a v režime diaľkových svetiel (High Beam – HB). Prepínanie medzi režimami je realizované pomocou pohyblivej clonky. Pri režime

stretávacích svetiel clonka zachytáva svetelné lúče odrážajúce sa zo spodnej strany reflektoru a vytvára tak hranicu svetla a tmy. V režime diaľkových svetiel sa clonka presunie smerom dolu zo svojej základnej pozície a nezachytáva tak žiadne svetelné lúče prichádzajúce od reflektoru. Svetlomet musí byť skonštruovaný tak, aby sa v prípade poruchy clonka vrátila do pozície svietenia stretávacích svetiel.



Obrázok 4.2: Mechanizmus ovládania clonky vozidla modelu Škoda Superb [13].

Bi – xenónové svetlomety poskytujú navýšenie svetelného výkonu svetlometu, ktorý zlepšuje viditeľnosť pri jazde v noci. Oproti tradičným H7 halogénovým žiarovkám ide o 86 % zväčšenie svetelného výkonu. Zároveň maximalizuje osvetlenie smerom ku kraju vozovky, ktorá je osvetlená výraznejšie a na väčšej ploche. Hlavnou výhodou takéhoto svetlometu spočíva v úspore jedného svetelného zdroja, menším elektrickým príkonom a menším konštrukčným rozmerom svetlometu.

Svetlomet Jaguar XK bolo nutné po úvodných meraniach v laboratóriách VŠB-TU Ostrava a meraniach fotometrických veličín a homogenity vyžarovania optického žiarenia vo firme Varroc Lighting Systems s.r.o. s pôvodnou riadiacou elektronikou rozobrať. Demontáž sa realizovala prostredníctvom tepelného roztavenia spoja v oblasti základného puzdra a krycieho skla svetlometu s využitím zobrazenia 3D rezu svetlometu, viď obr. 4.3. Následne bolo možné navrhnutý modulátor optického signálu umiestniť za pôvodnú riadiacu elektroniku a realizovať moduláciu jednotlivých DRL LED segmentov.

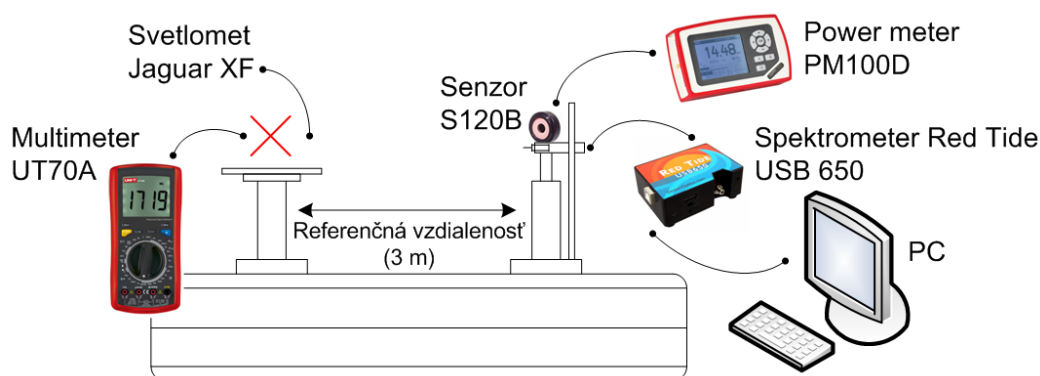


Obrázok 4.3: Demontáž svetlometu Jaguar XK v mieste spoja základného puzdra.

## 4.1 Experimentálne meranie základných parametrov denného svietenia Jaguar XK

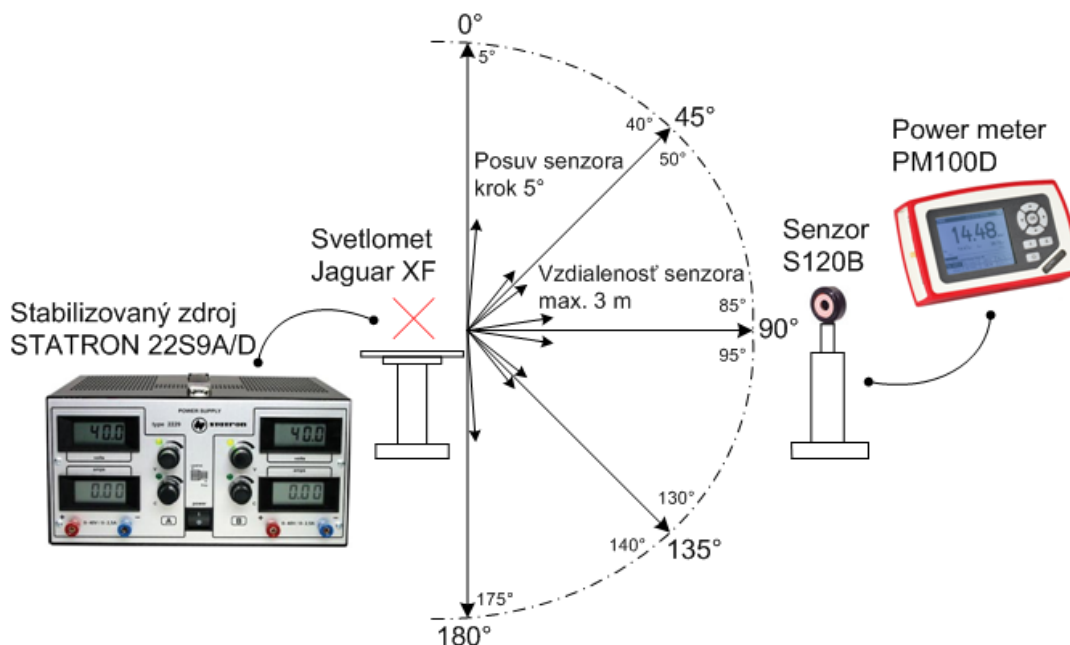
Cieľom úvodného experimentálneho merania bolo analyzovanie parametrov denného svietenia DRL predného svetlometu skonštruovaného pre vozidlo Jaguar XK. Tieto údaje boli nevyhnutne potrebné pri návrhu optického modulátoru pre tento svetlomet. Merania boli realizované v laboratóriu telekomunikačnej techniky (temná miestnosť) v priestoroch VŠB-TU Ostrava. Táto miestnosť sa vyznačuje eliminovaním parazitného svetla, ktoré by mohlo negatívne ovplyvniť výsledky meraní optického žiarenia svetlometu. V rámci meraní bola testovaná volt-ampérová charakteristika (VI), prevodová charakteristika (PI), spektrálna charakteristika a vyžarovacia charakteristika. Experimentálne merania boli realizované na mnohých navrhnutých a zostavených pracoviskách pri prevádzkovej teplote svetlometu.

Pracovisko pre meranie optického výkonu, napätia a spektra bolo skonštruované s využitím THORLABS sady, ktorá uchyťovala jednotlivé senzory a čidlá použitých meracích prístrojov. Ako zdroj stabilného napájania svetlometu bol použitý laboratórny zdroj STATRON 2229A/D, ktorým boli hodnoty napätia regulované až do maximálnej stanovenej hranice svetlometu  $U_F = 13,5$  V s krokom 0,5 V. Referenčná vzdialenosť senzorov od zdroja optického žiarenia bola stanovená na 3 m z dôvodu testovania fotometrických veličín a homogenity svetlometu pri rovnakej vzdialenosti. Takto zostavené experimentálne pracovisko bolo schopné zaznamenávať súčasne hodnoty optického výkonu, napätia a spektra aby boli dosiahnuté výsledky čo najpresnejšie, viď obr. 4.4.



Obrázok 4.4: Schéma experimentálneho meracieho pracoviska určeného pre meranie optického výkonu, napätia a spektra denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK.

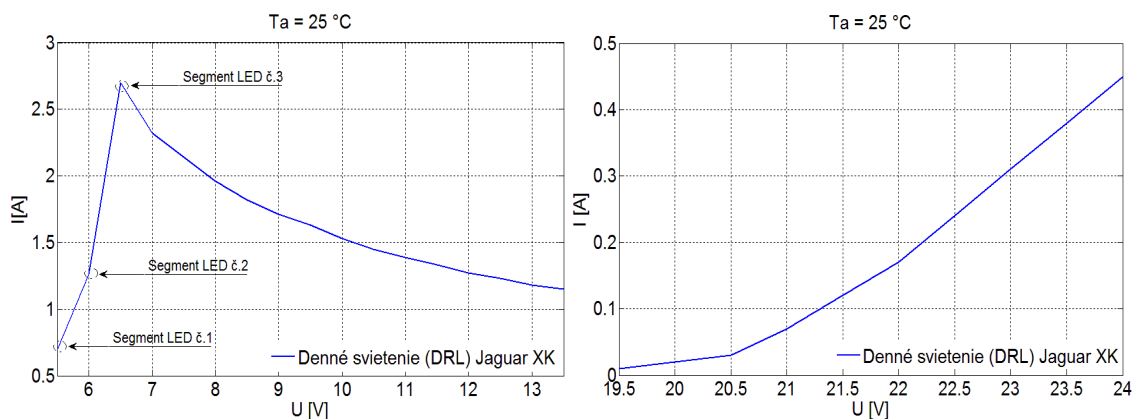
Druhé experimentálne pracovisko bolo skonštruované pre meranie vyžarovacej charakteristiky svetlometu Jaguar XK, kde bola opäť využitá sada THORLABS pre uchytenie jednotlivých senzorov a čidiel použitých meracích prístrojov. Svetlomet napájal stabilný laboratórny zdroj STATRON 2229A/D, ktorým bolo napätie nastavené na hodnotu  $U_F = 13,5$  V pri prevádzkovej teplote svetlometu. Celková konštrukcia bola navrhnutá tak, aby optický zdroj žiarenia bol umiestnený stacionárne a zároveň sa senzorová hlava S120B bola schopná pohybovať vo vymedzenom priestore pod uhlom  $0 - 180^\circ$  pri maximálnej vzdialenosti od zdroja optického žiarenia 3 m, viď obr. 4.5.



Obrázok 4.5: Schéma experimentálneho meracieho pracoviska určeného pre meranie vyžarovacej charakteristiky denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK.

#### 4.1.1 Volt-Ampérová charakteristika DRL

Volt-Ampérová charakteristika, ktorá je niekedy označovaná ako VI charakteristika, popisuje závislosť napätia  $U_F$  LED na pretekajúcom prúde  $I_F$  LED. Hodnoty napätia boli odčítavané z digitálneho multimetra UT720A, ktorý bol pripojený na vstupný konektor svetlometu denného svietenia DRL pri stanovenej referenčnej vzdialenosti, viď obr. 4.4.

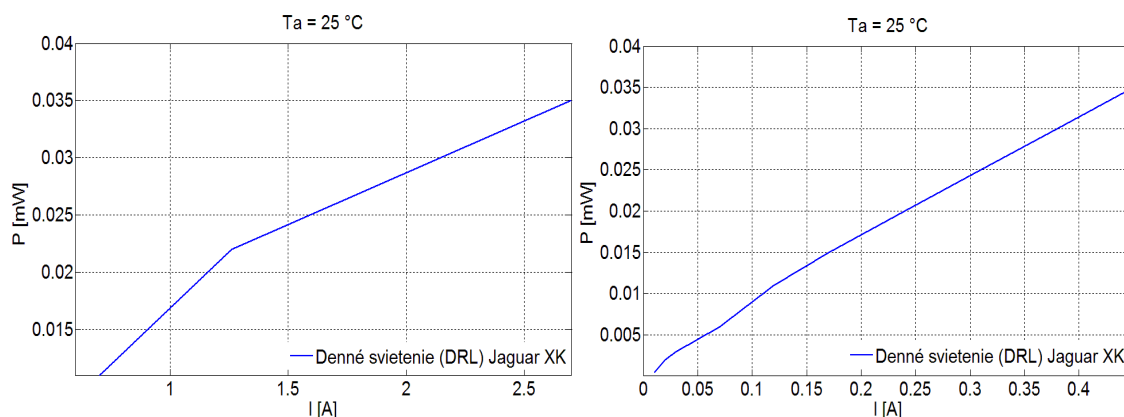


Obrázok 4.6: Volt-Ampérová charakteristika denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  s pôvodnou riadiacou elektronikou a bez nej.

Obrázok 4.6 zobrazuje volt-ampérovú charakteristiku denného svietenia s pôvodnou riadiacou elektronikou a bez nej pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Riadiaca elektronika ovplyvňuje veľkosť napätia  $U_F$  a pretekajúceho prúdu  $I_F$  vzhľadom k rozsvieteným LED segmentom. Pri nominálnom napätí  $U_N = 13,5\text{ V}$  bola nameraná hodnota pretekajúceho prúdu  $I_N = 1,15\text{ A}$ . Bez pôvodnej riadiacej elektroniky sa VI charakteristika zväčšovala lineárne, viď obr. 4.6b).

#### 4.1.2 Prevodová charakteristika DRL

Prevodová charakteristika, ktorá je tiež označovaná ako PI charakteristika, popisuje závislosť optického výkonu  $P$  na pretekajúcom prúde  $I_F$  LED. Hodnoty optického výkonu boli odčítavané z digitálneho power metra PM100D, ktorého senzorová hlava S120B bola umiestnená v stanovenej referenčnej vzdialenosti v priamom smere od zdroja optického žiarenia, vid' obr. 4.4. Pred samotným meraním optického výkonu bola analyzovaná hodnota vyžarovaného spektra, ktorá priamo ovplyvňuje vlnovú dĺžku svetla a tým aj hodnotu optického výkonu.



Obrázok 4.7: Prevodová charakteristika denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ °C}$  s pôvodnou riadiacou elektronikou a bez nej.

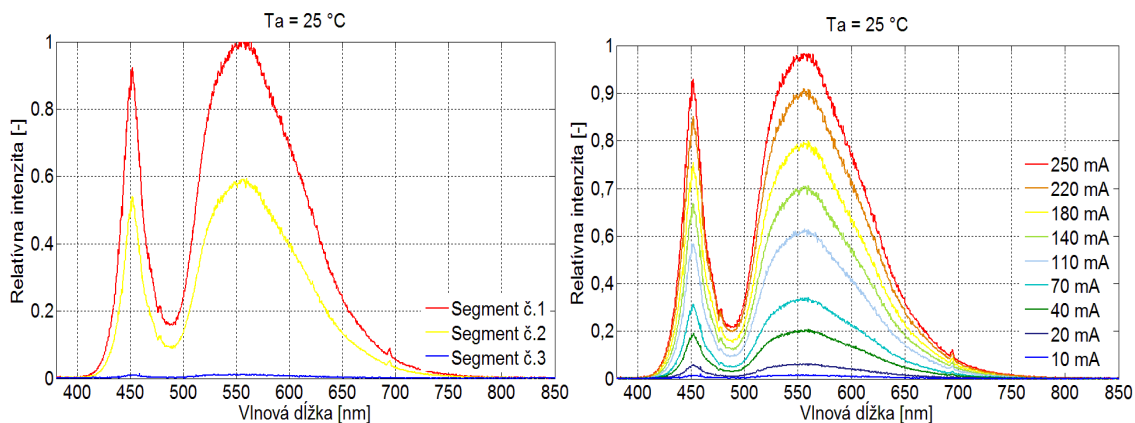
Na obrázku 4.7 je zobrazená prevodová charakteristika denného svietenia s pôvodnou riadiacou elektronikou svetlometu a bez nej pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ °C}$ . Optický výkon pri zapojení s pôvodnou riadiacou elektronikou sa zväčšuje lineárne v závislosti na prúde až do hodnoty  $I_F = 2,7\text{ A}$ , kedy dôjde k rozsvieteniu všetkých LED segmentov a hodnota optického výkonu  $P = 0,035\text{ mW}$  sa už ďalej nemení. Bez pôvodnej riadiacej elektroniky svetlometu sa hodnota PI charakteristiky zväčšovala lineárne, vid' obr. 4.7b.

#### 4.1.3 Spektrálna charakteristika DRL

Analýza spektrálnej charakteristiky denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK bola realizovaná s využitím navrhnutého meracieho pracoviska, vid' obr. 4.4. K meraniu bol využitý spektrálny analyzátor Red Tide USB650 s obslužným programom Safibra DAS 2.0. Senzorové vlákno spektrometra bolo umiestnené v priamom smere od zdroja optického žiarenia pri stanovenej referenčnej vzdialenosti 3 m.

Obrázok 4.8 zobrazuje spektrálnu charakteristiku denného svietenia svetlometu s pôvodnou riadiacou elektronikou a bez nej pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ °C}$ . Na výslednej charakteristike môžeme vidieť dominantnú oblasť fosforescencie s vlnovou dĺžkou 560 nm a potlačenú oblasť luminiscencie pri vlnovej dĺžke 450 nm. Denné svietenie teda vyžaruje neutrálne biele svetlo, ktoré je pre tento druh svietenia svetlometu typické. Rovnako môžeme na zobrazenom grafe sledovať závislosť spektrálnej charakteristiky na zmene prúdu  $I_F$ .

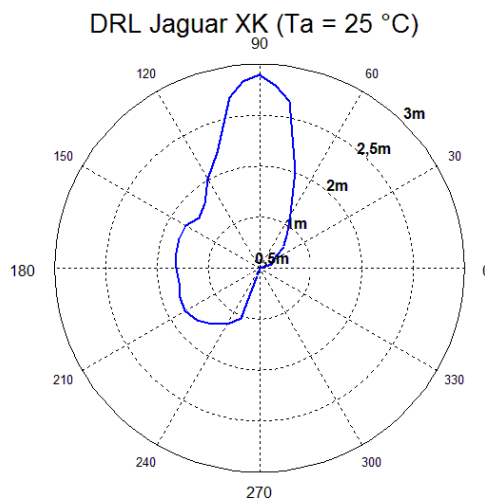




Obrázok 4.8: *Spektrálna charakteristika denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  s pôvodnou riadiacou elektronikou a bez nej.*

#### 4.1.4 Vyžarovacia charakteristika DRL

Vyžarovacia charakteristika denného svietenia svetlometu Jaguar XK bola testovaná pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  s využitím experimentálneho meracieho pracoviska, vid' obr. 4.5. S využitím tohto pracoviska bolo možné zaznamenávať hodnoty optického výkonu a súčasne meniť vzdialenosť a uhol natočenia senzorovej hlavy S120B od zdroja optického žiarenia. Na začiatku merania bol u zdroja optického žiarenia stanovený vymedzený optický výkon, ktorého hodnota sa v ďalšej fáze merania udržiavala s využitím zmeny vzdialenosti a uhlu natočenia senzoru v rozmedzí  $0 - 180^{\circ}$  so skokom  $5^{\circ}$  pri maximálnej vzdialenosti 3 m od zdroja optického žiarenia.



Obrázok 4.9: *Vyžarovacia charakteristika denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK pri teplote okolia  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .*

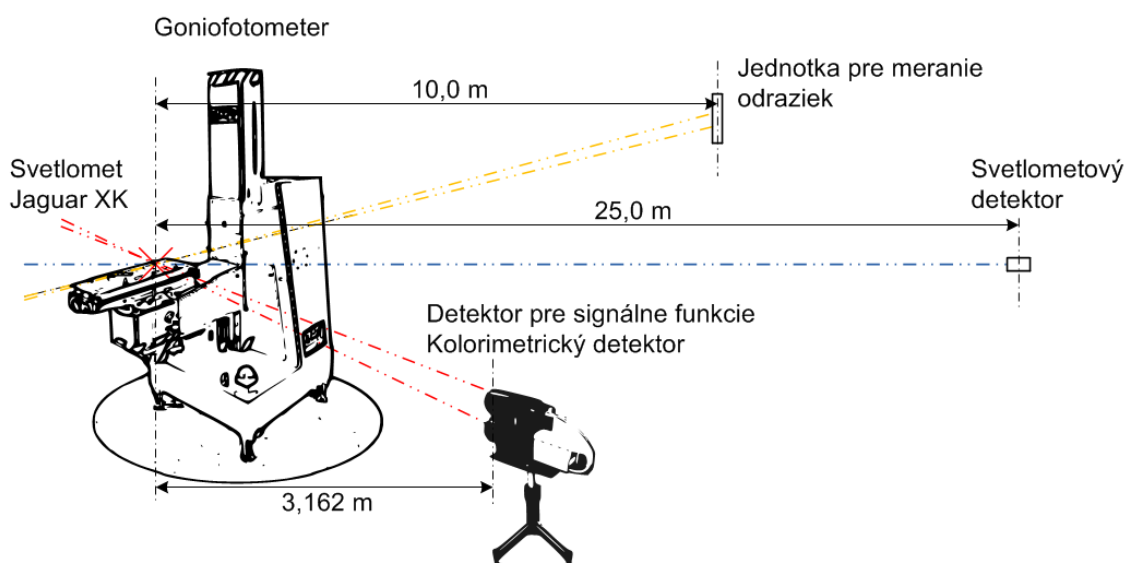
Výsledná vyžarovacia charakteristika denného svietenia svetlometu je zložená z hlavného svetelného laloku, ktorý vyžaruje v priamom smere od zdroja optického žiarenia pod uhlom  $90^{\circ}$  s veľkosťou vyžarovacieho uhlu  $30^{\circ}$ . Zároveň sa vyžarované svetlo šíri pozdĺž svetlometu, pričom kopíruje jeho konštrukčný tvar.

## 4.2 Experimentálne meranie fotometrických veličín a homogenity vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK

Experimentálne meranie fotometrických veličín a homogenity vyžarovaného optického žiarenia svetlometu Jaguar XK bolo realizované vo firme Varroc Lighting Systems s.r.o. v Novom Jičíne. Namerané údaje svetlometu s pôvodnou riadiacou elektronikou boli neskôr využité pri analýze a porovnávaní s údajmi získanými pri použití pokročilejších modulačných formátov. Testovanie homogenity vyžarovaného optického žiarenia prebehlo v tmavej miestnosti, ktorá je vyrobená zo svetlo neodrážajúceho čierneho materiálu a vyznačuje sa elimináciou parazitného optického žiarenia, ktoré by mohlo ovplyvniť výsledky merania. Pri meraní fotometrických veličín bol využitý prístroj goniofotometer, ktorý poskytuje kompletné riešenie pre meranie automobilového osvetlenia.

### 4.2.1 Analýza fotometrických veličín vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK

Fotometrické meranie bolo realizované v experimentálnej skúšobni s využitím prístroja goniofotometra. Ten je definovaný v ECE 37 (Economic Commission for Europe) ako zdroj s nominálnymi geometrickými a fotometrickými vlastnosťami. Výstupom tohto merania je protokol intenzít v meracích bodoch a isocandelová mapa, ktoré slúžia k validácii výrobu.



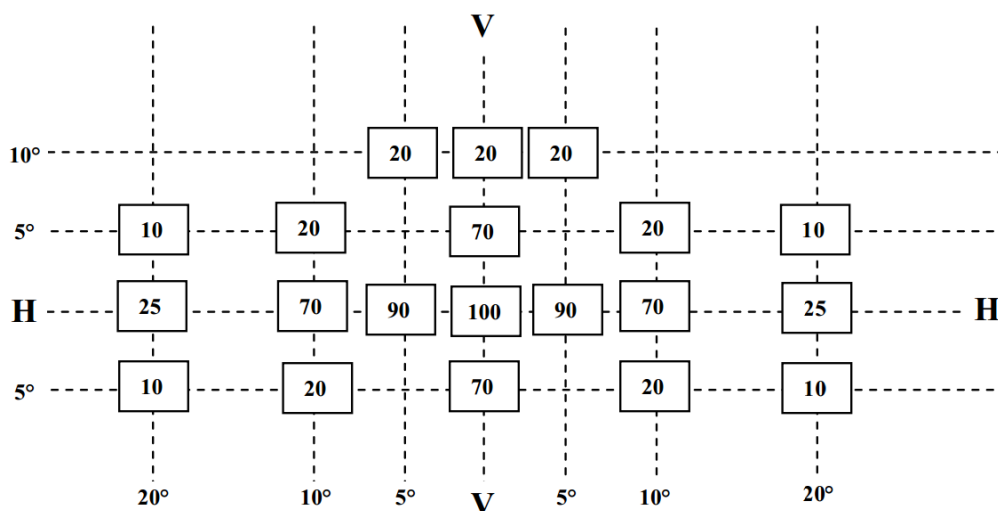
Obrázok 4.10: Plne vybavené pracovisko pre meranie fotometrických veličín automobilového osvetlenia s využitím goniofotometra.

Svetlomet Jaguar XK bol pri analýze fotometrických veličín umiestnený na posuvnom ramene prístroja goniofotometra. Testovanie denného svietenia DRL prebiehalo pri maximálnom napätí  $U_F = 13,5$  V a teplote okolia  $T_a = 25$  °C. Posuvné rameno prístroja počas testovania natáčalo samotný svetlomet pod uhlom od  $-20^\circ$  do  $20^\circ$  v horizontálnej osi a od  $-5^\circ$  do  $10^\circ$  v osi vertikálnej. Detektor pre signálne funkcie a kolorimetrický detektor bol umiestnený v referenčnej vzdialenosti 3,162 m od zdroja optického žiarenia, jednotka pre meranie odraziek

vo vzdialenosti 10 m a svetlometový detektor vo vzdialenosti 25 m, vid' obr. 4.10. Jednotlivé detektory sú umiestnené stacionárne. Pred spustením samotného meracieho procesu bol stanovený optický stred svetlometu. Pri realizovaní merania fotometrických veličín je nutné zabrániť zblúdilým odrazom s využitím svetlo neodrážajúcich materiálov v skúšobni.

ECE predstavuje predpisy stanovené štátmi v rámci Európskej Hospodárskej Komisie pre OSN. Podľa predpisov ECE sa neriadia len členské štáty Európskej únie, ale predstavujú aj vzor, z ktorého vychádzajú predpisy iných krajín ako napr. v Austrálii alebo na Novom Zélande. Testované denné svietenie DRL stanovuje predpis ECE R 87.

Podľa nariadenia č.7 tohto predpisu nemôže byť intenzita svetla vyžarovaná každým optickým zdrojom menšia ako 400 cd v smere vzťažnej osi. V prípade umiestnenia mimo vzťažnú os svetlometu nesmie hodnota intenzity svetla presiahnuť 1200 cd v ľubovoľnom smere viditeľnosti svetlometu. Zároveň intenzita vyžarovaného svetla nemôže byť menšia ako 1 cd v celom definovanom poli svetlometu. Ak svetlomet obsahuje viac ako jeden zdroj optického žiarenia, musí spĺňať požadovanú minimálnu intenzitu svietivosti, aj v prípade zlyhania jedného zdroja zo sústavy, a maximálna svietivosť nesmie byť prekročená, keď svietia všetky zdroje svetla. Skupina svetelných zdrojov, kde v prípade zlyhania jedného zdroja zo sústavy spôsobí zlyhanie celého svetlometu, sa považuje za jeden svetelný zdroj [15].



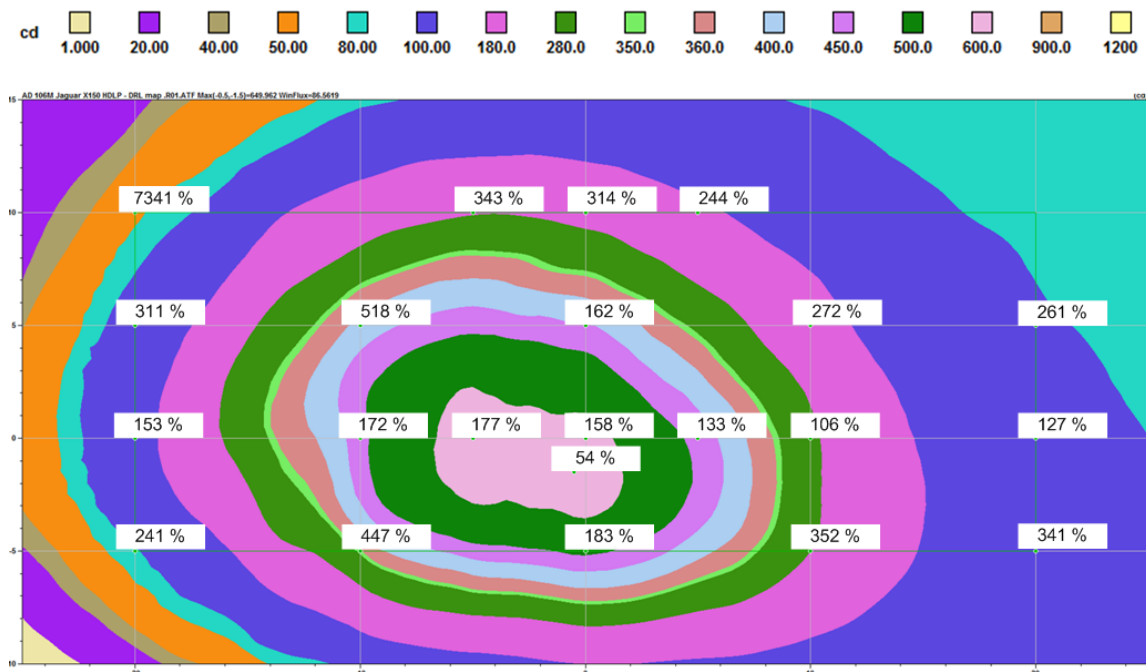
Obrázok 4.11: Typické rozloženie kontrolných bodov v isocandelovej mape stanovené ECE.

Nariadenie č.8 stanovuje, že oblasť svietiacej plochy v smere referenčnej osi svetidla nesmie byť menšia ako 25 cm<sup>2</sup> a nemôže byť väčšia ako 200 cm<sup>2</sup>. Minimálny vertikálny uhol priestorového rozloženia svetla je 10° nad a 5° pod horizontálnou osou [15].

Meranie fotometrických veličín bolo realizované po 1 minúte a po 30 minútach prevádzky svetlometu. Rozloženie intenzity svetla po 1 minúte prevádzky je možné vypočítať z rozloženia svetla po 30 minútach prevádzky použitím pomeru každého testovaného bodu po 1 minúte a 30 minútach prevádzky. V prípade, že by testovaný svetlomet bolo možné inštalovať



do vozidla na viac ako jednom mieste je nutné meranie opakovať pre každú polohu alebo na krajných polohách podľa špecifikácie výrobcu.



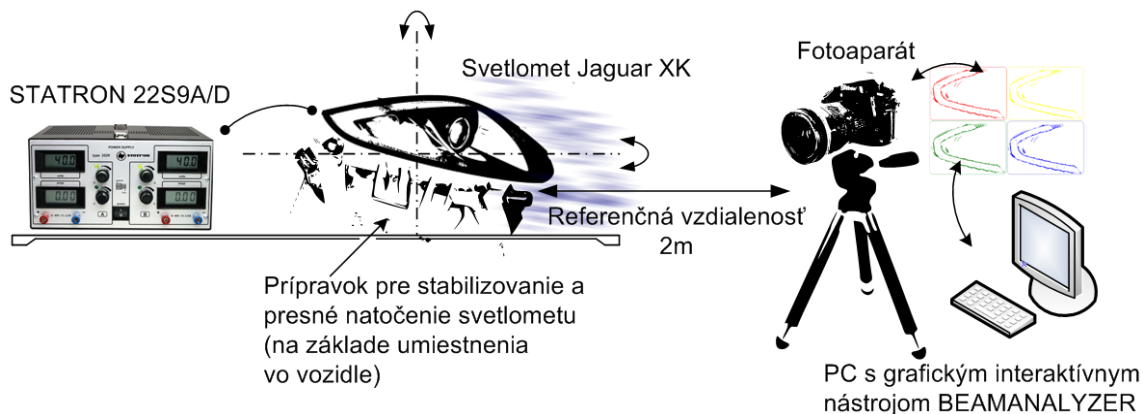
Obrázok 4.12: Rozloženie kontrolných bodov pri meraní fotometrických veličín v isocandelovej mape denného svietenia Jaguar XK.

Výsledná isocandelová mapa denného svietenia svetlometu Jaguar XK spĺňa stanovený predpis ECE R 87. Na základe zobrazenej isocandelovej mapy, vid' obr. 4.12 a protokolu intenzít v meracích bodoch, vid' tab. B.1 je zrejmé, že minimálna hodnota intenzity sa nachádza v bode 5D – 20L so 100,50 cd a maximum nadobúda v bode H – 5L s intenzitou 649,40 cd.

Smere  $H = 0^\circ$  a  $V = 0^\circ$  zodpovedá vzťažnej osi, ktorá predstavuje vo vozidle horizontálu rovnobežnú so strednou pozdĺžnou rovinou vozidla a je orientovaná v požadovanom smere svietivosti. Hodnoty protokolu intenzít v meracích bodoch udávajú minimálnu svietivosť pre rôzne smery merania, v percentách minimálne hodnoty požadované vo vzťažnej osi pre každý svetlomet (v smere  $H = 0^\circ$  a  $V = 0^\circ$ ) [15].

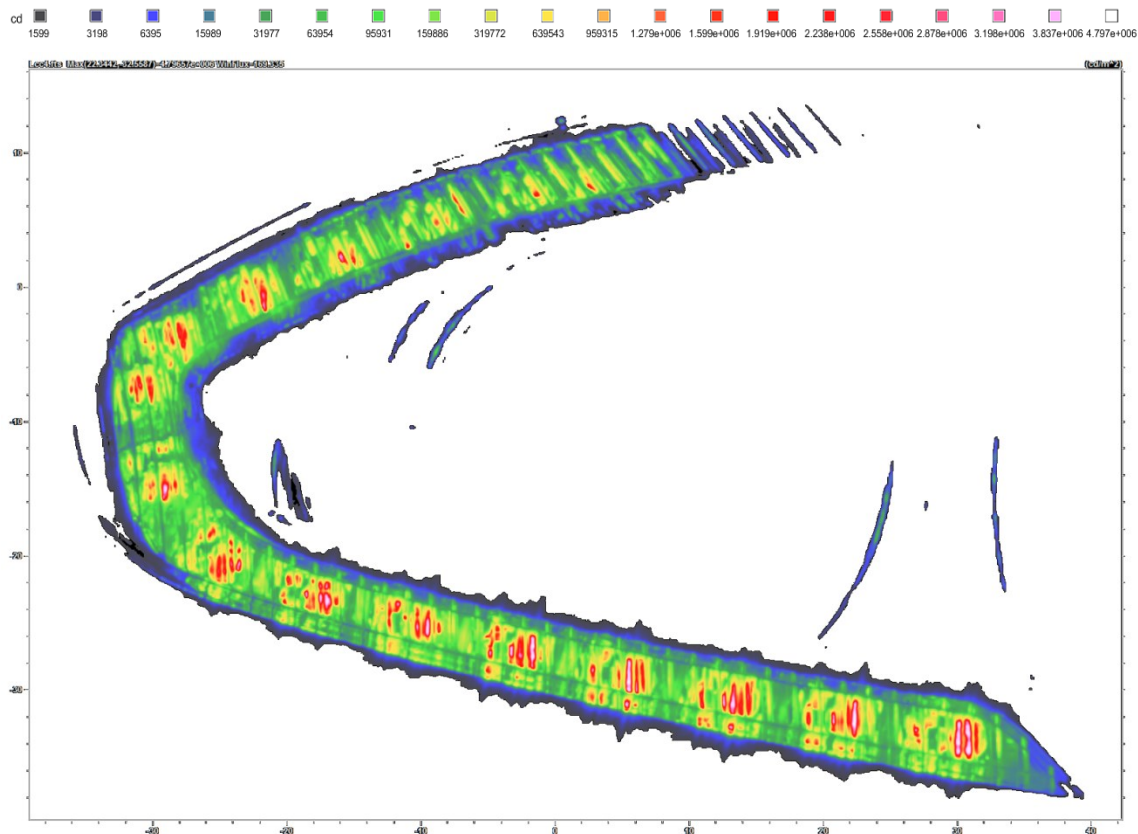
#### 4.2.2 Analýza homogenity vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK

Analýza homogenity vyžarovaného optického žiarenia denného svietenia bola realizovaná pri referenčnej vzdialenosti 2 m s využitím prípravku pre stabilizovanie a presné natočenie svetlometu. Homogenita denného svietenia bola testovaná pri maximálnom napätí  $U_F = 13,5$  V a teplote okolia  $T_a = 25$  °C. Pre vyhotovenie jasových snímok bol využitý fotoaparát s monochromatickým čipom a RGB filtrom. Z dôvodu veľkej dynamiky jasu svetla je jasová fotka vyhotovená niekoľkokrát pri rôznych dobách expozície (minimálne 12 snímok) a následne sú tieto fotky kombinované do jasovej mapy. Prvá vyfotená jasová fotka musí byť vyhotovená bez akéhokoľvek presatúrovaného pixelu.



Obrázok 4.13: Experimentálne pracovisko pre meranie homogenity vyžarovania optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK.

Fotoaparátom zachytené snímky sa prevádzajú na hodnoty jasu, pričom musí byť čip, z ktorého sa tieto hodnoty odčítavajú správne kalibrovaný. Kalibrácia je realizovaná tak, že hodnoty zodpovedajú  $\text{cd.m}^2$ . Zaznamenané sú vždy RGB hodnoty, ktoré sa musia skonvertovať na model CIE (x, y, z). V praxi nemôže byť pomer medzi najslabším a najsilnejším bodom danej funkcie väčší ako 1:3.



Obrázok 4.14: Jasová mapa denného svietenia Jaguar XK s pôvodnou riadiacou elektronikou svetlometu.

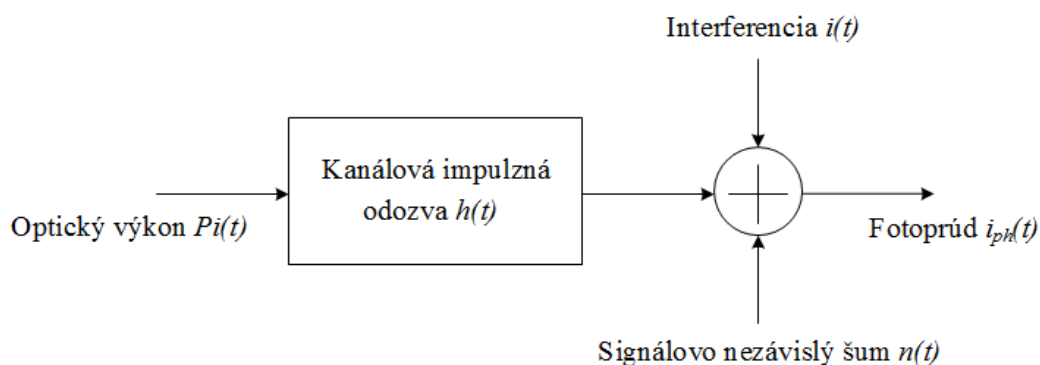
## 5 Optické bezvláknové dátové siete

V roku 1979 bol prvýkrát predstavený koncept optickej bezvláknovej siete, a to F.R. Gfellerem a U. Bapstem. Koncept, ktorý predstavili dosahoval prenosovú rýchlosť 1 Mbps a využíval difúzne optické žiarenie.

Technológia založená na optických sieťach dosahuje veľmi vysoké prenosové rýchlosti. Ide o bezdrôtovú komunikáciu, ktorá je založená na prenose optického žiarenia voľným priestorom. Súčasne ponúka bezpečný a širokopásmový symetrický prenos. V porovnaní s inými druhmi prenosu nie je optická sieť závislá na obmedzenom a regulovanom spektre a kmitočtovej licenci ako sú rádiové siete. Podmienkou pre úspešný prenos je priama viditeľnosť medzi vysielateľom a prijímateľom. Ako vysielateľ sa používa laser alebo LED a ako prijímateľ optický detektor. Preto optické jednotky pracujú v plnom duplexnom režime. Nevýhodnou prenosu optickej bezvláknovej dátovej siete je závislosť na vplyvoch atmosférického prenosového prostredia (smog, hmla, sneh atď.) [16].

### 5.1 Obecný model optického bezvláknového kanálu

Schéma obecného modelu optického bezvláknového kanálu s priamou detekciou IM/DD (Intensity Modulation / Direct Detection) a intenzitnou moduláciou je zobrazený na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1: Model optického bezvláknového kanála.

Priebeh prenášaného optického signálu je vo forme okamžitého výkonu  $P_i(t)$  zdroja optického žiarenia vo vysielacom (LED). Naopak výsledný prijatý optický signál  $i_{ph}(t)$  zodpovedá okamžitému fotoprúdu fotodiódy v prijímači. Optický bezvláknový kanál je možné modelovať ako lineárny, pásmový a časovo nemenný systém s okamžitou hodnotou vstupného optického výkonu  $P_i(t)$ , výstupným fotoprúdom  $i_{ph}(t)$  a impulznou odozvou systému  $h(t)$ .

Matematický zápis obecného modelu optického bezvláknového kanála je možné vyjadriť nasledujúcim vzťahom, vid' 5.1.

$$Y(t) = RX(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (5.1)$$

kde symbol  $\otimes$  označuje konvolúciu a  $R$  citlivosť detektoru. Táto rovnica popisuje obecný model optického bezvláknového kanálu ako jednoduchý lineárny kanál s aditívnym šumom.

Optické bezvláknové siete sú v reálnych situáciách prevádzkované v prítomnosti okolitého parazitného optického žiarenia v infračervenej alebo viditeľnej oblasti spektra. Toto parazitné žiarenie je možné minimalizovať použitím optického filtra, no napriek tomu sa pridáva výstrelkový šum, ktorý je zvyčajne dominantným zdrojom šumu v prijímači. Na obecnom modeli optického bezvláknového kanálu je tento šum označený ako  $n(t)$  [17].

Okrem výstrelkového šumu sa v optickom bezvláknovom kanále vyskytuje taktiež nebiela ne-Gaussová a nestacionárna interferencia. Predpokladá sa, že interferencia sa skladá z úzkopásmového rušenia NBI (Narrowband Interference) a impulzného širokopásmového rušenia WBI (Pulsed Wideband Interference).

$$i(t) = i_{nb}(t) + i_{wb}(t) \quad (5.2)$$

Príkladom úzkopásmového rušenia NBI sú typicky žiarivky, ktoré vykazujú súčet statických nízko-frekvenčných harmonických z napájania a chirp vysokofrekvenčnej harmonickej od riadiacej elektroniky. Typickým príkladom širokopásmového rušenia WBI je viaccestné šírenie v rámci optickej bezvláknovej dátovej siete.

V prípade, že optický komunikačný kanál tvorí iba optické žiarenie šíriace sa priamou cestou od vysielateľa k prijímaču (LOS), môžeme priemerný prijatý optický výkon fotodiódy vyjadriť vzťahom, vid'. 5.3.

$$P_d = \sum^{LED} P_t \cdot H_d(0) \quad (5.3)$$

kde  $H_d$  je rovnomerný zisk priamej optickej trasy v podobe:

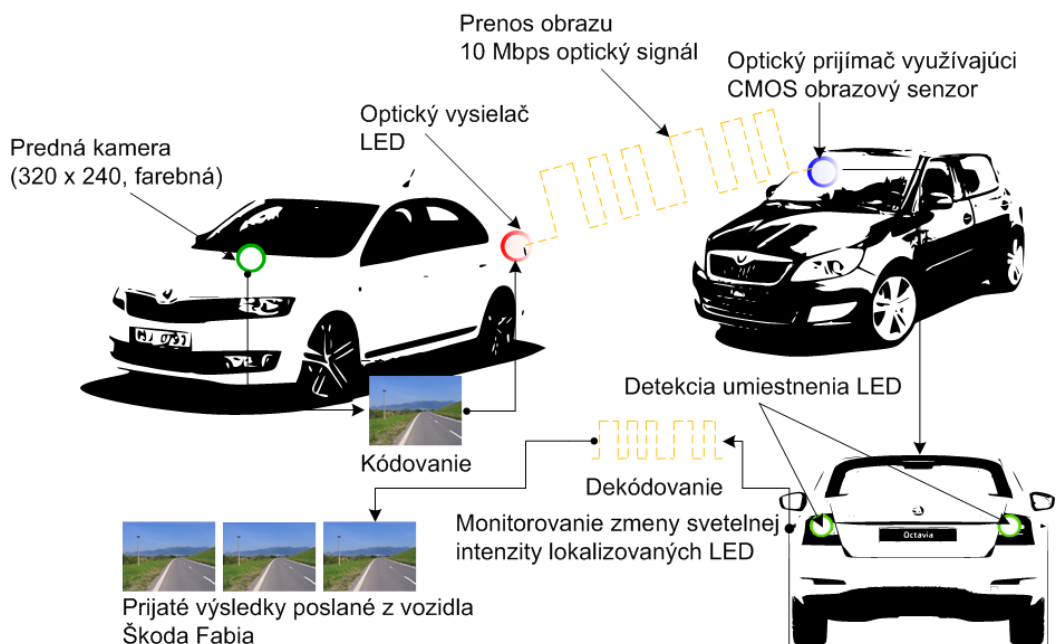
$$H_d(0) = \left\{ \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi) \right\} \quad (5.4)$$

vo vzťahu  $\Psi$  predstavuje uhol medzi normálou kolmou na prijímaciu oblasť fotodiódy a dopadajúcim optickým žiarením,  $\Psi_c$  je medzný uhol príjmu fotodiódy,  $A_{pd}$  je oblasť príjmu fotodiódy,  $T_s(\Psi)$  je zisk optického filtra a  $g(\Psi)$  je zisk optického koncentrátoru.

## 5.2 Optická komunikácia medzi vozidlami V2V

V súčasnosti sa smer výskumu v optických komunikáciách presúva k využitiu svetlo emitujúcej diódy LED k optickej bezvláknovej komunikácii OWC (Optical Wireless Communication) [18]. Práve technológia OWC využívajúca viditeľné optické žiarenie LED, označované ako optické žiarenie vo viditeľnej oblasti spektra VLC (Visible Light Communication), priťahuje veľa pozornosti v radoch odborníkov. Optický zdroj využívajúci LED diódu predstavuje vhodné zariadenie na odosielanie optického signálu z dôvodu možnosti

modulovania LED s použitím vysokých prenosových rýchlostí v porovnaní s tradičnými svetelnými zdrojmi. Medzi ich ďalšie nesporné výhody patria ich nízke výrobné náklady, vysoká energetická účinnosť a dlhá životnosť. Na základe týchto skutočností by sa mala stať komunikácia založená na OWC systémom blízkej budúcnosti. Toto rozširovanie okruhu využitia LED svetelných zdrojov dosiahlo už aj automobilový priemysel. Bežne sa využívajú v koncových svetlách, brzdových svetlách, svetlometov alebo v dopravnej signalizácii. V súlade s Vehicle-to-Vehicle (V2V) a Infrastructure-to-Vehicle (I2V alebo V2I) využívajú systémy OWC technológiu založenú na LED zdrojoch [19][20].



Obrázok 5.2: Komunikácia V2V medzi vozidlami s využitím LED zdroja pre vysielanie optického signálu a kamerové zariadenie pre príjem optického signálu.

Na strane prijímača v automobilových systémoch OWC sa očakáva využitie kamerového zariadenia. V súčasnosti sú kamery v automobilovom priemysle využívané pre bezpečnostné a komfortné aplikácie. Z tohto dôvodu je ich využitie ako optického prijímača v automobile jednoduché. Okrem toho kamerový prijímač poskytuje schopnosť neinterferenčnej komunikácie pre OWC systém vzhľadom k výbornej schopnosti priestorového oddelenia obrazového snímača obsiahnutého v kamere. To znamená, že technológia OWC využíva kameru (obrazový senzor) poskytujúcu bezpresluchovú komunikáciu s mnohonásobným prístupom LED bez zložitého protokolu a spracovania, zabráňujúcemu zmiešaniu optického signálu so šumom, akým je priamo dopadajúce slnečné žiarenie. Takúto možnosť neposkytujú žiadne iné bezvláknové komunikačné technológie a práve preto bude využitie kamerového zariadenia dôležitým krokom k realizácii OWC komunikácie pre vonkajšie prostredie v automobilovom priemysle [21].

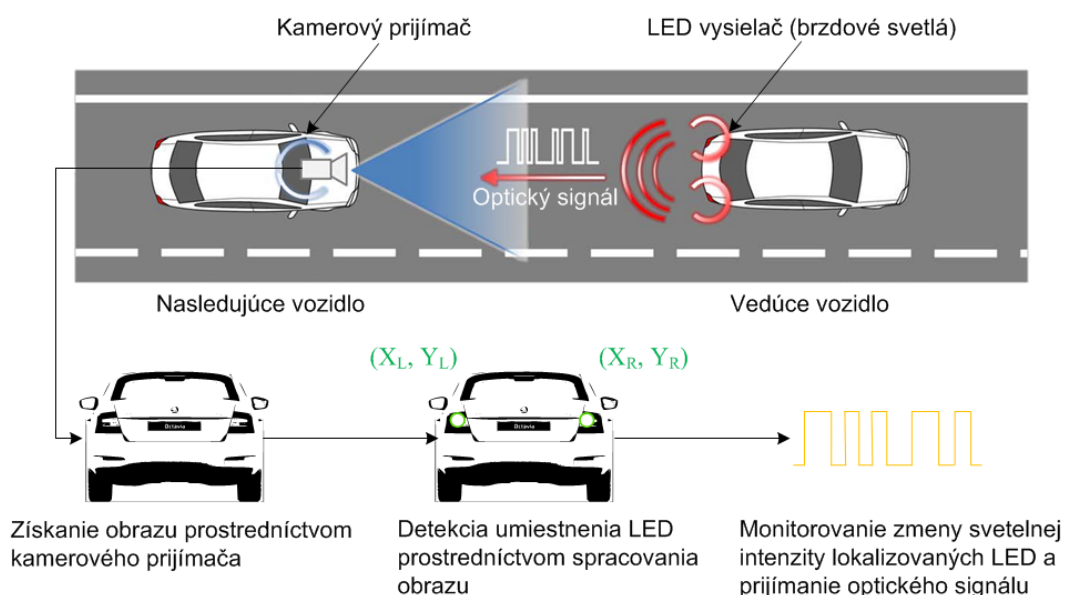
Existuje niekoľko vedeckých prác, ktoré popisujú výhody využitia kamerového zariadenia v OWC systéme, ale iba malá časť realizovala zavedenie tejto technológie do reálneho automobilového systému a vykonala testovanie počas skutočnej prevádzky vozidla pri

vonkajších svetelných podmienkach. Reálne využitie kamery ako prijímača v OWC systéme v automobilovom priemysle je podmienená zvýšením rýchlosti pre prenos dát a presnú a rýchlu detekciu LED. Súčasný kamerový systém použitý vo vozidlách dosahuje prenosovú rýchlosť desiatok kb/s alebo menej. Pre prenos rôznych interných dát vozidla (informácie o rýchlosti alebo brzdení) a veľkých multimediálnych dát (audio, video alebo snímky) je očakávaná prenosová rýchlosť viac ako niekoľko Mb/s na jeden pixel. Navyše prijímací systém musí detekovať LED v zachytenej snímke pomocou spracovania obrazu [20].

Pri kamerovom zariadení, ktoré funguje ako prijímač optického signálu sa počíta s využitím špeciálneho CMOS obrazového senzoru označovaného ako optický komunikačný obrazový senzor (OCI). OCI využíva takzvané komunikačné pixely (CPx), ktoré sú špecializované na vysokorýchlostný príjem optického signálu. Okrem toho obsahuje vstupný obvod reagujúci na intenzívne svetelné zdroje akými sú napríklad LED, a tým uľahčuje ich detekciu. OCI poskytuje kľúčovú technológiu pre optický príjem signálu a rýchlu a presnú detekciu LED prijímača kamery [22].

### 5.2.1 Prehľad optického V2V komunikačného systému

Optický V2V komunikačný systém znázorňuje predchádzajúca schéma komunikácie medzi vozidlami, viď obr. 5.2. Vo vedúcom vozidle sú umiestnené LED vysielajúce, ktoré využívajú svetelné zdroje nachádzajúce sa vo vozidle akými sú obrysové svetlá, brzdomerové svetlá a svetlomety. V nasledujúcom vozidle je naopak umiestnený kamerový prijímač. Vedúce vozidlo zhromažďuje rôzne vlastné interné dáta (ako napríklad rýchlosť) a posielajú ich nasledujúcemu vozidlu prostredníctvom optického signálu. V rovnakom čase kamerový prijímač na nasledujúcom vozidle zachytáva prenášané obrazy a hľadá umiestnenie LED v nasnímaných záberoch prostredníctvom spracovania obrazu. Následne systém optického prijímača monitoruje svetelnú intenzitu v lokalizovaných LED a prijíma optický signál [20].



Obrázok 5.3: Proces zachytenia optického signálu pri V2V komunikácii.

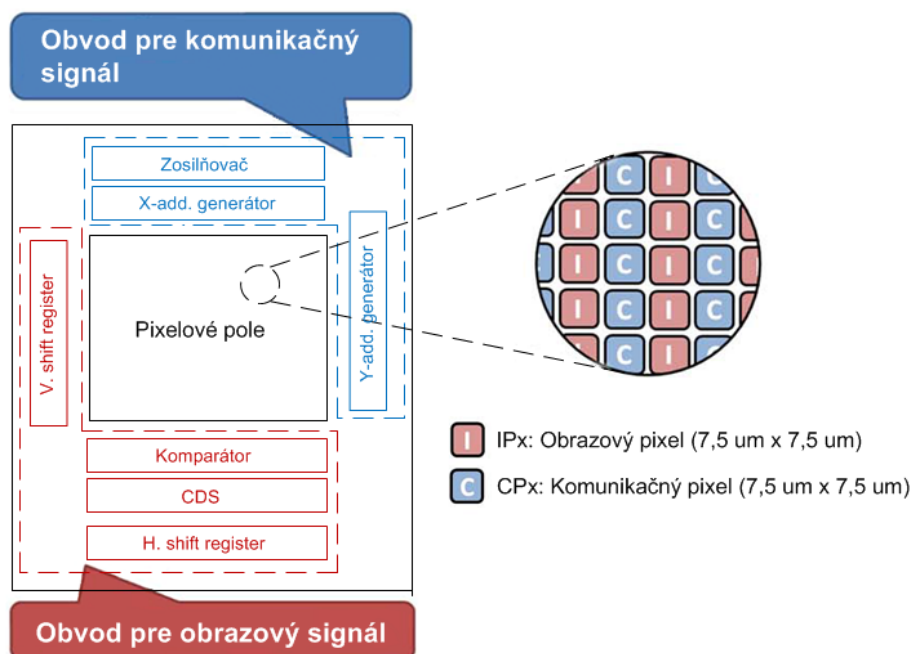


V blízkej budúcnosti nebudú zábery zachytené kamerovým prijímačom používané len pre lokalizáciu LED, ale rovnako aj pre bezpečnostné a komfortné aplikácie, akými sú detekcia pruhov a detekcia chodcov. Inými slovami budú tieto dve zariadenia kombinované do jednej kamery, ktorá bude využívaná pre obe funkcie. Z tohto dôvodu nebude zvyšovanie nákladov na výrobu veľké, pretože väčšina komponentov kamery môže byť prebraná, a nie je potrebný žiaden ďalší priestor pre kamerový prijímač.

OWC technológia patrí medzi komunikácie s priamou viditeľnosťou LOS (Line-Of-Sight). Vzhľadom k tomu, že je optický signál šírený priamou trasou medzi vysielačom a prijímačom, môže byť ľahko blokovaný predmetmi, ktoré sa nachádzajú v priestore komunikačného kanálu (budova, múr, hmla, atď.). Okrem toho je dosah komunikácie obmedzený v oblastiach prekrývajúceho sa uhlu vyžarovania svetla LED vysielača a uhla pohľadu AOV (Angle-Of-View) kamerového prijímača. Naopak táto nevýhoda eliminuje problém komunikačného systému s viaccestným šírením a zjednodušuje prepojenie návrhov.

### 5.2.2 Optický komunikačný senzor OCI

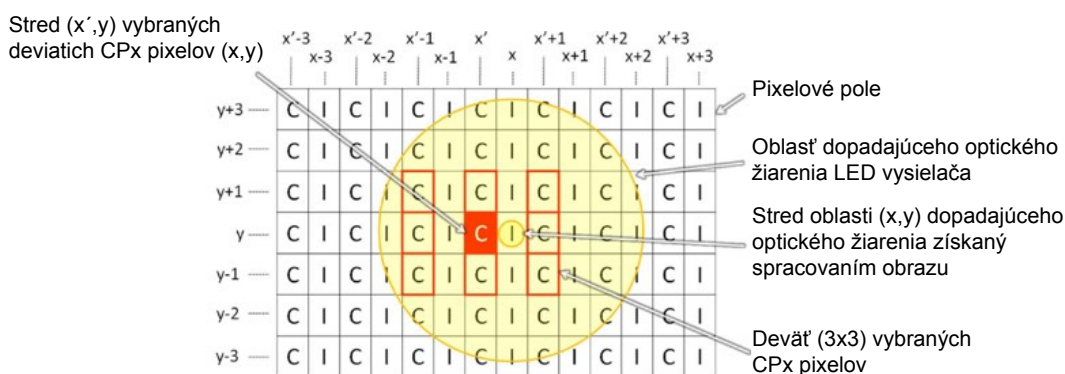
Optický komunikačný senzor OCI je vyrobený s hrúbkou  $0,18\text{ }\mu\text{m}$  prostredníctvom CMOS technológie. Pre príjem vysokorýchlostného optického signálu boli navrhnuté komunikačné pixely CPx. K výrobe CPx pixelov je využívaná pinová PD technológia, ktorá poskytuje výrazne zlepšenie rýchlosti odozvy reagujúcej na zmenu intenzity svetla. OCI pixel pozostáva z CPx a obrazových IPx pixelových polí. IPx pole zachytáva snímky slúžiace pre detekciu LED vysielača a CPx pole prijíma optický signál. Tieto hybridné pixelové polia sú integrované v OCI s periférnymi obvodmi, ktoré riadia proces zachytenia obrazu a prijatie optického signálu [20].



Obrázok 5.4: Štruktúra optického komunikačného senzoru OCI [20].

OCI realizuje zachytenie dvoch typov snímok prostredníctvom IPx poľa. Jeden druh snímku má konvenčne šedý obraz a ďalší je 1-bitový, ktorý označuje obraz pre rýchlu detekciu LED zdroja optického žiarenia. Označujúca snímka je vytvorená s veľmi krátkou dobou expozície v porovnaní so šedým snímkom a je binarizovaná periférnym obodom pre obrazový signál. Z tohto dôvodu sú objekty s nízkou svetelnou intenzitou dokonale odstránené. Na druhú stranu, objekty s vysokou svetelnou intenzitou, akými sú LED zostávajú v označujúcom snímku. Z takéhoto snímku je možné vypočítať pozíciu LED veľmi rýchlo, pretože väčšina nepotrebných objektov je odstránená.

Súradnice LED zdrojov optického žiarenia sú vypočítané v procesore na externom zariadení s využitím základných techník spracovania obrazu a sú prevedené do X a Y adresy. Celá táto operácia sa opakuje kontinuálne s vysokorýchlostným príjmom optického signálu a monitorovaním LED vysielача.



Obrázok 5.5: Lokalizovanie deviatich (3x3) komunikačných pixelov CPx [20].

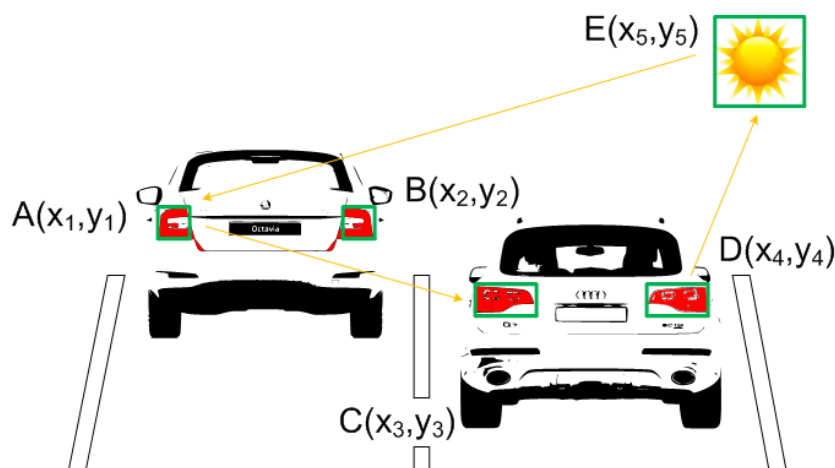
Spolu s označením pozície aktuálneho LED zdroja je vybraných deväť (3x3) CPx pixelov naviazaných na centrálny prvok ( $x_0, y$ ), pričom sú vybrané súčasne. Tieto vybrané komunikačné pixely CPx vymedzujú krajný hraničný priestor, kedy je možné v prípade premiestnenia zdroja z aktuálnej pozície ( $x, y$ ) zachovať prebiehajúcu komunikáciu. Tento fakt umožňuje technológií založenej na OCI prijímať vysokorýchlostný optický signál, pričom neustále kontroluje pozíciu zdroja v reálnom čase.

### 5.2.3 Optický systém kamerového prijímača a LED vysielача

Optický vysielач v systéme OWC pre komunikáciu medzi vozidlami je zložený zo sústavy LED a riadiacej jednotky vrátane PC. Riadiaca jednotka sa stará o zber rôznych dát, ktoré sú určené pre odoslanie a realizuje ich kódovanie.

Prijímacia časť tohto systému využíva kameru s 12,5 mm objektívom, ktorého uhol pohľadu je  $22^\circ$  v horizontálnej osi a  $16^\circ$  v osi vertikálnej. Prostredníctvom PC sú nastavené parametre kamerového prijímača a rovnako obsahuje softvér pre zobrazenie prijatých dát. Označujúci a šedý snímok je kamerovým systémom vyhotovený v časovom intervale 16,6 ms (rýchlosťou až 60 snímok za sekundu). Prijatý optický signál je digitalizovaný 80-MSPS ADC a ekvalizovaný konečnou impulznou odozvou FIR filtra [20].





Obrázok 5.6: Výber postupnosti zachytených svetelných zdrojov prijímacím systémom.

Pri situácii, kedy je na prijatej snímke zachytených súčasne viac zdrojov svetelného žiarenia, si kamerový prijímač označí každý zdroj svetla inou syntaxou ako napríklad A, B, C, D a E, vid' obr. 5.6. Z týchto zdrojov si následne vyberie jeden, od ktorého prijíma optický signál ( $A(x_1, y_1)$ ) a po ukončení komunikácie prejde na druhý v poradí ( $B(x_2, y_2)$ ). Tento proces sa periodicky opakuje do momentu, kedy je doručená nasledujúca označujúca snímka a stanovený nový svetelný zdroj. V prípade, že nie je prenášaný paket zachytený v stanovenom čase sa tento svetelný zdroj preskočí a vyberie sa ďalší v poradí. Z tohto dôvodu sú parazitné zdroje svetla ako slnko alebo pouličné osvetlenie vynechané v reálnom čase.

#### 5.2.4 Optický V2V komunikačný systém

Prenášané interná dáta optickým kanálom medzi vozidlami obsahujú ID vozidla, LED ID pre identifikáciu ľavej a pravej strany vozidla, rýchlosť vozidla, informácie o prevádzke rôznych zariadení vo vozidle (brzdy, svetlomety, smerové svetlá) a informácie o vzdialenosti medzi ľavou a pravou stranou LED sústavy. Obidve sústavy vo vozidle posielajú rovnaké dáta s výnimkou LED ID. Predná kamera je schopná vyhotoviť snímku s rýchlosťou 20 fps, pričom táto snímka je komprimovaná do JPEG formátu. Podľa realizovaných testov je možné dosiahnuť rýchlosť vyhotovenia snímky 15 fps pri dennom osvetlení a približne 10 fps pri nočných svetelných podmienkach [20].

Relatívnu rýchlosť medzi vozidlami je možné vypočítať z rozdielu medzi rýchlosťou vedúceho a nasledujúceho vozidla. Pri výpočte vzdialenosti medzi vozidlami  $L$  sú využité dáta o vzdialenosti medzi ľavou a pravou LED sústavou vo vozidle, vid' vzťah 5.5.

$$L = \frac{f}{a} \cdot \frac{D}{n} \quad (5.5)$$

kde  $L$  je vzdialenosť medzi vozidlami,  $D$  je vzdialenosť medzi pravou a ľavou LED sústavou,  $f$  je ohnisková vzdialenosť objektívu a  $a$  je veľkosť IPx.

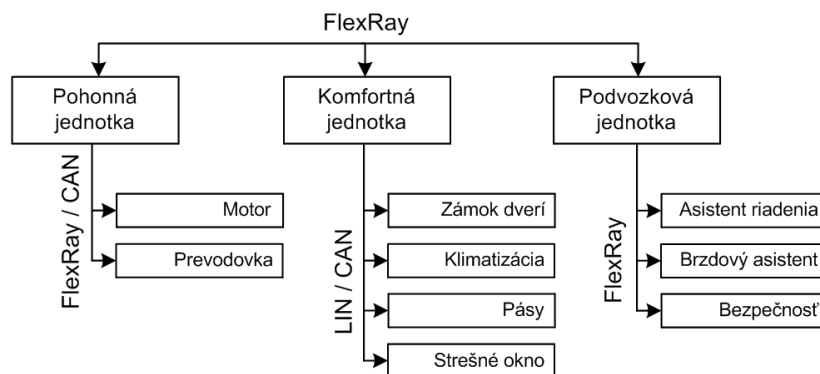
## 6 Komunikačné zbernicové systémy v automobile

Osobné automobily, nákladné autá a dokonca aj vlaky sa stávajú súčasťou mobilnej siete, ktorá spája širokú škálu vlastností a funkcií, vrátane ovládacích prvkov vozidla s možnosťou bezdrôtového pripojenia. Aplikácie medzi ktoré patria hlavne bezpečnosť a kontrola vozidla vyžadujú použitie niekoľkých zavedených sieťových štandardov ako LIN, CAN, MOST, FlexRay alebo IDB-1394.

Používané sieťové štandardy sú fyzicky prepojené prostredníctvom káblového pripojenia a využívajú priame zavedenie napájania z akumulátora vozidla. Samotné požiadavky na spoľahlivosť a odolnosť elektroniky vozidla sú veľmi vysoké a práve preto je elektronika vozidla riešená ako decentralizovaná architektúra, teda prepojenie jednotlivých riadiacich jednotiek je realizované pomocou zbernice. Každý elektronický systém implementuje do vozidla vlastnú riadiacu elektroniku vrátane snímačov, senzorov a akčných členov. Súčasne zavedené štandardy zbernic sa vzájomne od seba líšia topológiou, prenosovým médiom a fyzickou vrstvou ale hlavne protokolmi vyšších vrstiev [24].

### 6.1 FlexRay

Komunikačný protokol FlexRay predstavuje vysokorýchlostné dátové pripojenie (prenosová rýchlosť od 500 kb/s až 10 Mb/s) jednotlivých riadiacich aplikácií vo vozidle. Podporuje prenos veľkého objemu dát, ktoré produkujú dnešné sofistikované automobilové systémy medzi ktoré patrí napríklad telemetria, riadenie prešmyku kolies, tvrdosť tlmičov, ABS, systémy jazdnej stability atď. V dôsledku možnosti využitia statického a dynamického prístupu na zbernicu je vhodný hlavne pre spracovanie informácií v reálnom čase, kde je vyžadovaný okamžitý prenos určených dát.



Obrázok 6.1: *Integrovanie komunikačnej zbernice FlexRay do riadiacich systémov vozidla v kombinácii so štandardmi LIN a CAN.*

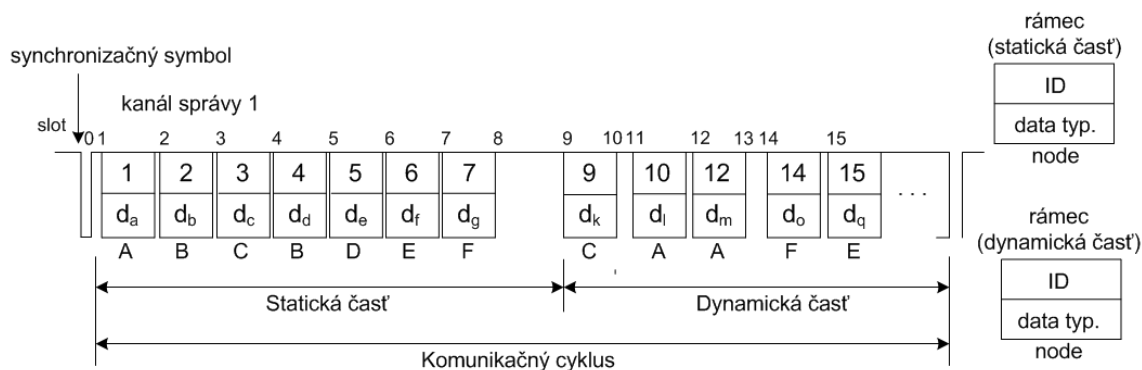
Štandard FlexRay je definovaný koncernom združujúcim popredných výrobcov automobilov a ich komponentov (Chrysler, BMW, General Motors, Ford, Volkswagen, Bosh, Freescale, Philips). Výhodou tohto protokolu oproti používaným CAN a LIN je veľká prenosová rýchlosť, ochrana prenášaných dát, dvojkanálová štruktúra a zároveň statický

i dynamický prístup na zbernicu. Prepojenie nadradeného systému vozidla (CPU) so zbernicou FlexRay sa realizuje prostredníctvom integrovaných obvodov [23].

FlexRay nie je využívaný na všetkých úrovniach dátového prenosu v automobiloch, ale je vhodne dopĺňovaný zaužívanými štandardmi CAN a LIN, viď obr. 6.1. Využíva sa ako centrálna sieť, zatiaľ čo CAN a LIN vytvárajú prepojenie s menej náročnými časťami systému.

### 6.1.1 Prenosová štruktúra štandardu FlexRay

Komunikačná zbernica FlexRay umožňuje v rámci jednej skupiny navrhnuť niekoľko rôznych typov topológií a komunikačných ciest. Prístupná je konfigurácia typu jednokanálovej alebo dvojkanálovej zbernice (single channel / dual channel bus network), sieť typu hviezda (star network) alebo rôzne hybridné kombinácie týchto štruktúr. V prípade prepojenia viacerých skupín sa komunikácia realizuje prostredníctvom komunikačného radiča DCC (Different Communication Controller).



Obrázok 6.2: Komunikačný cyklus kanálu prenášaného rámcom s využitím statického a dynamického prístupu na zbernicu [23].

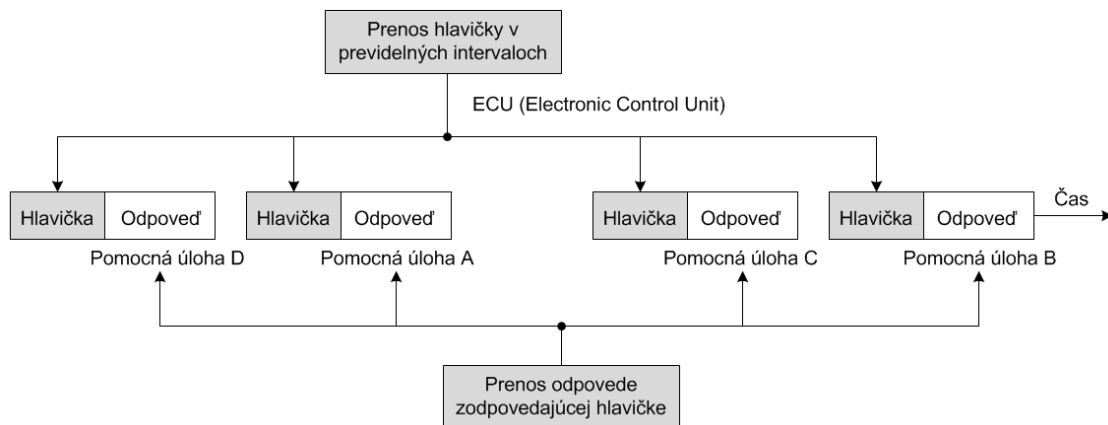
Dvojkanálová štruktúra umožňuje lepšie zabezpečenie komunikácie kritických systémov a funkcií, ktoré musia vo vozidle pracovať za každých okolností. Medzi takéto systémy sa radí napríklad brzdový systém (ABS) a záchranné systémy (airbagy), kde zlyhanie systému môže spôsobiť vážnu dopravnú nehodu.

Štandard FlexRay implementuje softvérové a hardvérové zabezpečenie prenosu dát tvorené CRC cyklickým súčtom aplikovaným na celý prenášaný rámec a BG obvody (Bus Guardian) kontrolujúce reálny stav prenosu – napät'ové úrovne na vodičoch zbernice. Na základe zistených výsledkov chybovosti je potom koordinovaná celá funkcia postihnutých FlexRay uzlov zásahom nadriadeného systému. Filtrovanie správ sa strane prijímača je možné realizovať prostredníctvom message ID prenášaného v rámci ako súčasť dát a generovaného nadriadeným systémom.

## 6.2 LIN

Zbernica LIN (Local Interconnect Network) dosahuje prenosovú rýchlosť 20 kbit/s s využitím jedného prenosového média pracujúcim pri napätí 12 V DC. Medzi typické

aplikácie LIN patria spínače, pohony (elektrické sťahovanie okien, modul zamykania), kontrola riadiacej elektroniky komfortných systémov (multifunkčný volant, elektrické spätné zrkadlá) a senzory (klimatizácia, osvetlenie, dažďové senzory, inteligentné stierače). Táto zbernica využíva jednu hlavnú jednotku označovanú ako ECU (Electronic Control Unit) a viac uzlov, vid' obr. 6.3. Slúži k pripojeniu aplikačných modulov k vozidlu pre sprístupnenie diagnostiky a identifikácií problému vo vozidle [24].



Obrázok 6.3: Štruktúra komunikačnej správy v systéme prenášaná LIN zbernicou.

Špecifikácia LIN zbernice vyžaduje jej plnú funkčnosť aj v prípade mimoriadnych udalostí počas prevádzky vozidla. Využíva nadprúdovú ochranu pre obmedzenie nadmerných prúdov v prípade skratu alebo preťaženia systému. Ochranný obvod rovnako obsahuje modul proti prepätiu, ktorý obmedzuje napäťové špičky.

## 6.3 CAN

Zbernica CAN (Controller Area Network) je v súčasnosti najpoužívanejšou zbernicou v moderných automobiloch, ktorá poskytuje prenosovú rýchlosť až 1 Mbit/s. V automobiloch je prostredníctvom CAN napájaná celá elektronická sústava od sledovania otáčok motora až po systém ABS. Systém realizuje sústavnú kontrolu a vyhodnocovanie prevádzkových parametrov vozidla, čo vedie k zvýšeniu spoľahlivosti a bezpečnosti. Zbernica CAN je normalizovaná podľa ISO 1189, takže umožňuje prenos dát medzi jednotkami od rôznych výrobcov [24].

## 6.4 MOST

Vysoko rýchlostná multimediálna zbernica MOST (Media Oriented Systems Transport) je optimalizovaná pre použitie v automobiloch a využíva plastové optické vlákno ako prenosové médium. Jedná sa o zbernicu typu bod – bod a jej sieťová topológia je realizovaná ako kruh.

Zbernica MOST umožňuje pripojenie nízko inteligentných zariadení medzi ktoré patrí mikrofón alebo aktívne reproduktory a rovnako aj pripojenie inteligentných zariadení ako GPS navigácia, zabezpečovací systém, digitálny rádio prijímač atď. Prenos môže byť synchronný alebo asynchronný, podľa toho, aké zariadenia vo vozidle medzi sebou komunikujú.

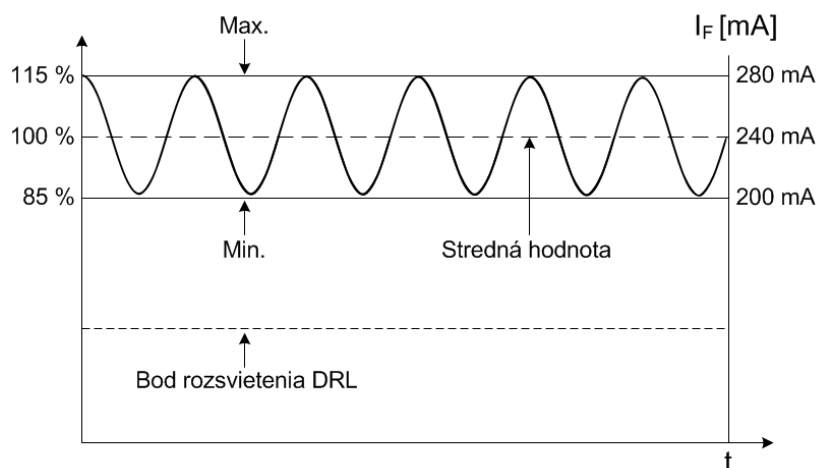
## 7 Koncept vysielacieho systému Jaguar XK

Jednou z úloh diplomovej práce bolo navrhnutie vysielacieho systému zloženého zo signálového generátora a obvodu schopného modulovať denné svietenie svetlometu vozidla Jaguar XK. Výsledný koncept vysieláča sa ubera cestou najnovších zahraničných štúdií venujúcich sa oblasti komunikácie medzi vozidlami. Navrhnuté riešenie vysieláča využívajúceho DRL je kompatibilné pre nasadenie vo V2V komunikácií v kombinácii s PIN fotodetektorom alebo kamerovým systémom vozidla na strane prijímača.

Návrh vysieláča optického signálu sa sústreďuje na pokročilé digitálne modulačné formáty, ktoré využívajú k prenosu nosnú vlnu. Pre čo najlepšie využitie lineárnej časti PI charakteristiky použitých LED zdrojov v jednotlivých segmentov sa realizovalo nastavenie pretekajúceho kľudového prúdu DRL na polovicu maximálnej hodnoty.

$$\bar{X}_{\max} = \frac{I_{F(s)} \cdot I_{F(\max)}[\%]}{I_{F(s)}[\%]} = \frac{240 \cdot 115}{100} = 276 \cong 280 \text{ mA} \quad (7.1)$$

$$\bar{X}_{\min} = \frac{I_{F(s)} \cdot I_{F(\min)}[\%]}{I_{F(s)}[\%]} = \frac{240 \cdot 85}{100} = 204 \cong 200 \text{ mA} \quad (7.2)$$



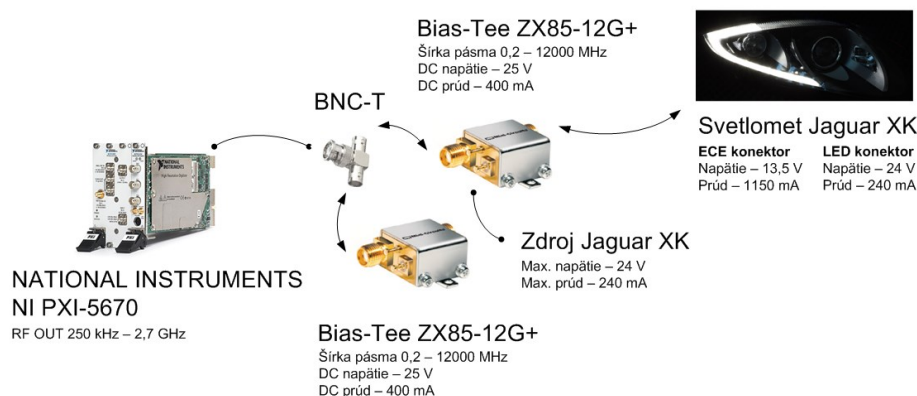
Obrázok 7.1: Stanovená stredná hodnota a medzné hodnoty komunikácie DRL.

Z dôvodu možnosti nasadenia navrhnutého prenosového konceptu v automobilovom priemysle bol návrh modulátora ovplyvnený nutnosťou dodržania stanovenej normy ECE R 87 zaoberajúcej sa DRL vozidla. Pri modulovaní jednotlivých LED segmentov DRL je preto potrebné počítať s poklesom intenzity optického žiarenia, ktoré by mohlo mať negatívny vplyv na funkciu svetlometu.

Systém vysieláča optického signálu je preto navrhnutý tak, že jednotlivé LED segmenty svietia na strednej hodnote  $I_{F(s)} = 240 \text{ mA}$ , vid' obr. 7.1 a komunikácia prebieha v stanovených medziach, aby pokles intenzity optického žiarenia nebol markantný.

## 7.1 Návrh vysielacieho systému J.1

Koncept návrhu vysielacieho systému J.1 denného svietenia svetlometu vozidla Jaguar XK stavia na zahraničných štúdiách v oblasti VLC a využitia bielej LED pre vysokorychlostný optický prenos dát. Výsledné zariadenie je využiteľné v kombinácii s PIN fotodetektorom alebo kamerovým systémom vozidla na strane prijímača.



Obrázok 7.2: Bloková schéma návrhu konceptu vysielacieho systému J.1 denného svietenia vozidla Jaguar XK.

Zariadenie Bias-Tee ZX85-12G+ v navrhnutom koncepte vysielacieho systému slúži pre zlúčenie jednosmerného signálu na DC porte s rádiovým signálom na RF porte. Kombinovaný RF+DC signál slúži pre nastavenie pracovného bodu modulácie jednotlivých LED segmentov DRL na strednú hodnotu  $I_{F(s)} = 240$  mA. Napájanie DC portu je realizované prostredníctvom riadiacej elektroniky svetlometu.

Bias-Tee v kombinácii s vysokofrekvenčným operačným zosilňovačom OPA694ID bol odsimulovaný v programe Multisim 13.0 od firmy National Instruments. Kompletný návrh riešenia je uvedený v elektronickej prílohe.

### 7.1.1 Bias-Tee ZX85-12G+

Bias-Tee ZX85-12G+ od firmy Mini-Circuits® poskytuje veľkú šírku pásma a to 0,2 – 1200 MHz, pričom zvláda prevádzkové teploty od -55 °C do 100 °C. Výhodou tohto zariadenia je možnosť použitia vysokých prúdov na DC vstupe a to  $I_{max} = 400$  mA pri napájacom napätí  $U_{max} = 25$  V, ktoré sú nevyhnutné vzhľadom k vstupným parametrom modulátora. Bias-Tee využíva vstupný a výstupný konektor typu SMA pri konštrukčných rozmerov celého zariadenia 1,88 cm x 1,9 cm x 1,17 cm [25].

Impedancia  $Z_0$  zariadenia bias-tee ZX85-12G+ má typickú hodnotu 50 Ω. Impedancia kondenzátora  $X_C$  je stanovená na oveľa menšiu hodnotu ako  $Z_0$  a naopak impedancia cievky  $X_L$  je stanovená na oveľa väčšiu hodnotu ako  $Z_0$ .

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi f C} ; X_L = j\omega L = j2\pi f L \quad (7.3)$$

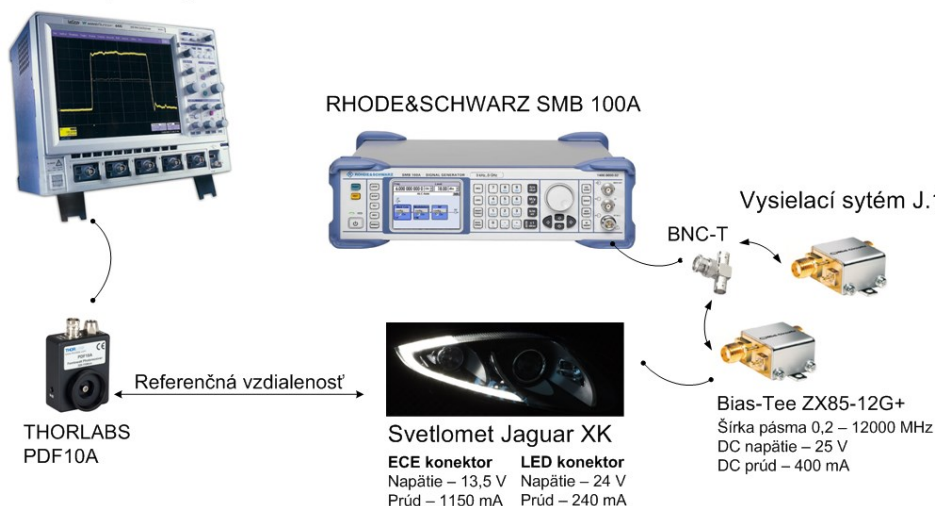
## 7.2 Testovanie vysielacieho systému J.1

Testovanie obvodu navrhnutého vysielacieho systému som realizoval v laboratóriu temná miestnosť v priestoroch VŠB-TU Ostrava, ktorá zabezpečuje elimináciu parazitného svetla v miestnosti, ktoré by mohlo negatívne ovplyvniť výsledky merania.

Zapojenie obvodu bolo skonštruované s využitím blokovej schémy konceptu vysielacieho systému J.1, vid' obr. 7.2. Po zostavení experimentálneho pracoviska som v prvej fáze skontroloval hodnoty napätia v daných bodoch vzhľadom k návrhu. Konkrétne sa jednalo o vstupné napätie na DC vstupe Bias-Tee, vstupné napätie na RF vstupe Bias-Tee a výstupné napätie privedené na jednotlivé LED segmenty DRL Jaguar XK. Analyzované hodnoty sa pohybovali v rámci návrhu, a preto som pristúpil k samotnému testovaniu frekvenčných charakteristík, vid' obr. 7.3.

Frekvenčné charakteristiky boli testované pomocou osciloskopu Lecroy 204xi, generátoru signálu RHODE&SCHWARZ SMB 100A a fotodetektoru THORLABS PDA10A.

Osciloskop Lecroy 204xi



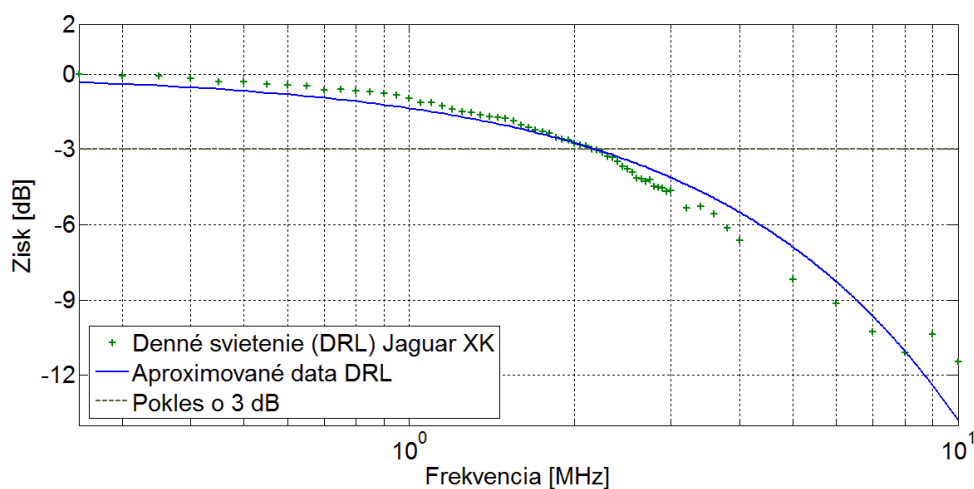
Obrázok 7.3: Schéma zapojenia experimentálneho meracieho pracoviska pre testovanie frekvenčných charakteristík.

Na obr. 7.4 a obr. 7.5 sú zobrazené frekvenčné charakteristiky testovaného obvodu vysielacieho systému a optického výstupu DRL. Tabuľky nameraných výsledkov sú uvedené v elektronickej prílohe, kde sú uložené hodnoty napätia špička – špička analyzované osciloskopom. Následne bolo napätie prevedené na zisk vzhľadom k referenčnej hodnote 250 kHz, vid' vzťah 7.4.

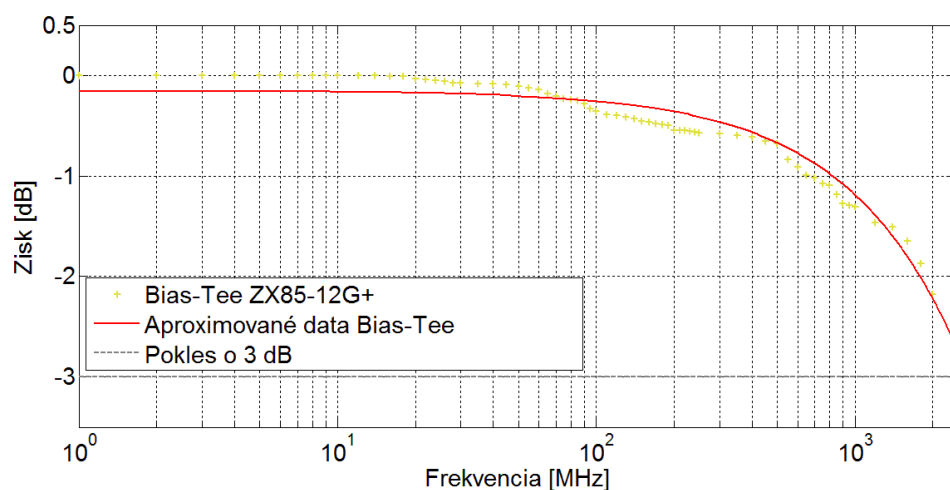
$$A = 20 \log \frac{U_1}{U} \quad (7.4)$$

kde  $U_1$  je analyzované napätie špička – špička a  $U$  je referenčná hodnota napätia pri 250 kHz.

Dosiahnuté výsledky som aproximoval pomocou metódy najmenších štvorcov v programe MATLAB a výsledky som vykreslil formou grafov, vid' obr. 7.4 a obr. 7.5.



Obrázok 7.4: Frekvenčná charakteristika optického výstupu DRL Jaguar XK.



Obrázok 7.5: Frekvenčná charakteristika Bias-Tee ZX85-12G+.

Frekvenčná charakteristika obvodu a optického výstupu DRL bola testovaná s využitím fixného prúdu  $I_{F(s)} = 240$  mA, ktorý bol prekrývaný malým striedavým signálom  $I_F = \pm 40$  mA. Po určení prenosovej šírky pásma pre úroveň 3 dB bola stavená frekvenčná odozva. LED zdroje použité v DRL vykazovali pokles o 3 dB pri frekvenciách približne 2,4 MHz pričom zariadenie Bias-Tee ZX85-12G+ nedosiahlo hranicu poklesu o 3 dB ani v prípade použitia maximálnej prípustnej frekvencie signálového generátora RHODE&SCHWARZ SMB 100A 2,5 GHz.



## 8 Digitálne modulácie

Digitálne modulácie predstavujú v súčasnosti najpoužívanejší druh modulácie, kde je zdrojom modulačného signálu diskretný signál, najčastejšie nejaká bitová postupnosť. Tá môže ovplyvňovať amplitúdu, frekvenciu alebo fázú nosného signálu. Pri dvojstavových moduláciách zodpovedá táto zmena iba dvom hodnotám, a to  $\log 0$  a  $\log 1$ . Potreba navýšenia prenosovej kapacity viedla k rozvoju viacstavových modulácií, kde každý signálový prvok modulovanej nosnej vlny prenáša najmenej 2 bity. Príkladom takejto modulácie je modulácia 4-ASK, ktorá zaujíma štyri diskkrétne amplitúdy a v každej reprezentuje 2 bity. Viacstavové modulácie ponúkajú prenos väčšieho množstva informácií pri rovnakej šírke pásma a vyšších prenosových rýchlostiach [26].

S digitálnymi moduláciami sa pre ich jednoduchosť počíta hlavne v základnom pásme, čo vedie k úspore výpočetného výkonu. Prevod digitálneho signálu do prenosového pásma sa realizuje prostredníctvom namodulovania na spojitú nosnú frekvenciu. Počas demodulácie sa na začiatku zmiešavajú na medzifrekvenciu alebo do základného pásma, vzorkujú a následne sú spracovávané ako diskkrétne signály [38][40].

### 8.1 Parametre digitálnych modulácií

Rozlíšenie a porovnávanie jednotlivých digitálnych modulácií sa realizuje prostredníctvom ich základných parametrov. Medzi hlavné patrí šírka pásma modulovaného signálu, pomer signál – šum, bitová alebo symbolová chybovosť.

#### 8.1.1 Šírka pásma

Šírka pásma označovaná ako  $B$  je dôležitým parametrom pri charakterizovaní pásmových modulovaných signálov. Definícia šírky pásma má niekoľko variant podľa toho, k akému účelu tento parameter potrebujeme.

Absolútna šírka pásma je určená rozsahom kmitočtov v ktorých má signál nenulovú spektrálnu hustotu. V prípade kedy má spektrum signálu konkrétne nulové body vymedzujúce hlavný lalok, je takáto šírka pásma označovaná ako nula – nula  $B_{00}$ .

Pri šírke pásma pre danú úroveň sa najčastejšie stretávame so šírkou  $B_3$  pre úroveň 3 dB. Takáto šírka pásma stanovuje rozsah ohraničený kmitočtami, na ktorých klesne výkonová spektrálna hustota o polovicu svojej maximálnej hodnoty, t.j. o 3 dB. Okrem úrovne 3 dB sa často používa šírka pásma  $B_{20}$  pre úroveň 20 dB [27].

#### 8.1.2 Pravdepodobnosť chyby

Veličina pravdepodobnosť chyby je definovaná pomerom počtu chybne prenesených bitov za jednotku času k celkovému počtu bitov prenesených za jednotku času. Meraním na konkrétnom systéme je možné získať bitovú chybovosť BER (Bit Error Rate), viď vzťah 8.1.

$$BER = \frac{n_{BE}}{n_B} \quad (8.1)$$

Obdobným spôsobom je definovaný pomer počtu chybne prenesených symbolov za jednotku času k celkovému počtu prenesených symbolov označovaný ako symbolová chybovosť SER (Symbol Error Rate), vid' vzťah 8.2.

$$SER = \frac{n_{SE}}{n_S} \quad (8.2)$$

Hlavným ovplyvňujúcim faktorom chybovosti pre konkrétny modulačný systém je odstup nosnej od šumu CNR. Teoretické vzorce sú ale idealizované a počítajú len s jediným zdrojom rušenia v modulačnom systéme, a to bielym gaussovským šumom AWGN, pričom zanedbávajú pôsobenie ďalších rušivých vplyvov akými sú fázový šum oscilátoru, nelinearita koncových stupňov vysieláčov, rôzne druhy únikov atď. [27].

### 8.1.3 Modulačná rýchlosť

Parameter modulačná rýchlosť  $v_m$  predstavuje počet symbolov prenesených za jednu sekundu alebo rýchlosť, ktorou sa mení stav nosnej. Táto rýchlosť sa rovná prevrátenej hodnote doby trvania  $a$  symbolu a je vyjadrená v jednotkách Baud, vid' vzťah 8.3.

$$v_m = \frac{1}{a} \quad (8.3)$$

Modulačná rýchlosť ovplyvňuje dobu trvania symbolu, a tým zmenu jednotlivých stavov. Z tohto faktu plynú požiadavky na medzný kmitočet  $f_m$ , vid' vzťah 8.4, takže modulačná rýchlosť nemôže presiahnuť hodnotu  $2f_m$ .

$$v_m \leq 2 \cdot f_m \quad (8.4)$$

### 8.1.4 Prenosová rýchlosť

Prenosová rýchlosť reprezentuje počet prenesených bitov za sekundu, vid' vzťah 8.5. Signál môže nadobúdať rôznych hodnôt. V prípade dvojstavových modulácií má každý symbol informáciu o jednom bite. Pri štvorstavovej modulácii už každý symbol reprezentujú dva bity.

$$v_p = v_m \cdot \log_2 m \quad (8.5)$$

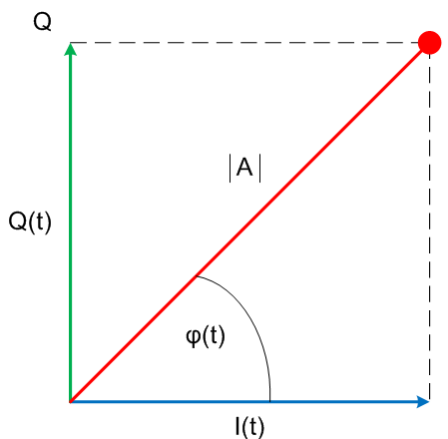
Viacstavové modulácie ponúkajú navýšenie prenosovej rýchlosti, ale zároveň zníženie modulačnej rýchlosti.

## 8.2 Metódy vyhodnocovania parametrov digitálnych modulácií

Pre zobrazovanie digitálnych modulácií sa využíva IQ diagram, ktorým je možné zobrazit' väčšinu typov digitálnych modulácií, ale v praxi sa častejšie využíva zobrazenie prostredníctvom vektorového diagramu, konštelačného diagramu a diagramu oka.

### 8.2.1 IQ diagram

IQ diagram predstavuje metódu vyhodnocovania parametrov, ktorá dokáže zobrazit' väčšinu digitálnych modulácií. Táto vlastnosť metódy je spôsobená tým, že ľubovoľný vysokofrekvenčný signál o konštantnej uhlovej frekvencii  $\omega_c$  a o ľubovoľnej časovej premennej fázy  $\varphi(t)$  a amplitúde  $A(t)$  je možné zobrazit' v komplexnej rovine ako fázor, ktorý je zložený z dvoch kvadrátúrnych zložiek, a to  $I(t)$  a  $Q(t)$ . Obe zložky majú zhodné frekvencie, ale sú fázovo posunuté o  $90^\circ$ , vid' obr. 8.1 [28].



Obrázok 8.1: Zobrazenie kvadrátúrnych zložiek IQ diagramom.

Závislosti medzi jednotlivými zložkami sú definované vzťahmi, vid'. vzťah 8.6 až 8.10.

$$a(t) = A(t) \sin(\omega t + \varphi) \quad (8.6)$$

$$a(t) = I(t) \sin \omega t + Q(t) \sin \omega t \quad (8.7)$$

$$A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \quad (8.8)$$

$$I(t) = A(t) \cos \varphi(t) \quad (8.9)$$

$$Q(t) = A(t) \sin \varphi(t) \quad (8.10)$$

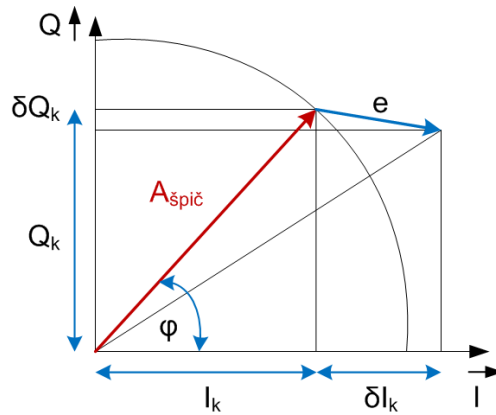
### 8.2.2 Vektorový diagram

Vektorový diagram je vyhotovený zobrazením výsledníc modulačných zložiek  $I$  a  $Q$ . Tento diagram slúži pre zobrazenie jednotlivých stavov digitálnej modulácie a rovnako zobrazuje aj prechody medzi nimi. Na vektorovom diagrame sú vidieť cesty, ktorými prechádza nosná pri prechode z jedného stavu do druhého, nie je však explicitne vidieť chyby v jednotlivých stavových polohách [28].

### 8.2.3 EVM

Táto metóda vyhodnocovania parametrov digitálnych modulácií je založená na porovnávaní aktuálnych hodnôt amplitúdy a fázy meraného signálu s referenčnými hodnotami, ktoré sú priebežne počítané na základe parametrov modulačného systému. Rozdiel medzi týmito

hodnotami tvorí základ pre meranie EVM. EVM predstavuje strednú kvadratickú hodnotu chybných hodnôt jednotlivých stavov a využíva sa pre meranie kvalitatívnych parametrov prijímača alebo vysielača [28].



Obrázok 8.2: Grafické zobrazenie vyhodnocovacej metódy EVM.

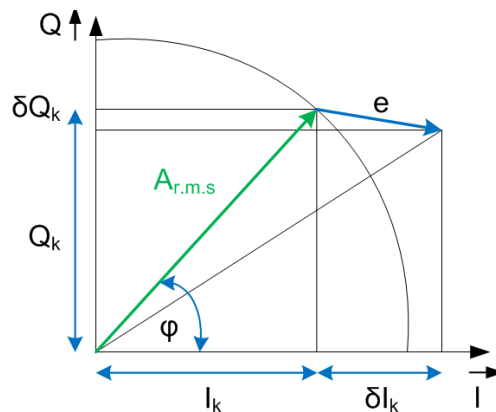
V prípade správneho vyhodnotenia signálu, umožňuje EVM posúdenie kvality a rovnako výborný prehľad o šume a skreslení.

$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\delta I_k^2 + \delta Q_k^2)}{|v_{\max}|}} \quad (8.11)$$

kde  $\delta I_k$  je rozdiel medzi veľkosťou ideálnej a meranej zložky  $I$ ,  $\delta Q_k$  je rozdiel medzi ideálnou a meranou zložkou  $Q$ .

#### 8.2.4 MER

Metóda vyhodnocovania parametrov digitálnych modulácií MER predstavuje podobný údaj, akým je odstup signálu/šumu v prípade analógových systémov. Je definovaná ako pomer súčtu štvorcov amplitúd ideálnych symbolových vektorov k súčtu štvorcov amplitúd chybových symbolových vektorov [28].



Obrázok 8.3: Grafické zobrazenie vyhodnocovacej metódy MER.

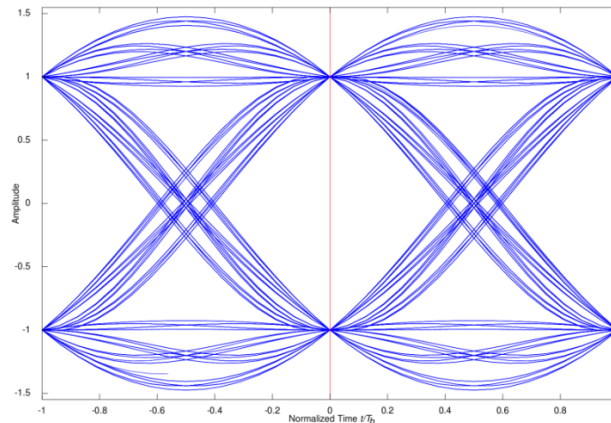
Chybový vektor  $e$  je definovaný ako vzdialenosť od ideálnej polohy k aktuálne prijatému symbolu. Výsledok je najčastejšie udávaný v decibeloch.

$$MER = 20 \log \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}{\sum_{k=1}^N (\delta I_k^2 + \delta Q_k^2)}} \quad (8.12)$$

kde  $I_k$  je ideálna veľkosť zložky  $I$ ,  $Q_k$  je ideálna veľkosť zložky  $Q$ ,  $\delta I_k$  je rozdiel medzi veľkosťou ideálnej a meranej zložky  $I$ ,  $\delta Q_k$  je rozdiel medzi veľkosťou ideálnej a meranej zložky  $Q$  [28].

### 8.2.5 Oko diagram

Oko diagram predstavuje množinu všetkých odoziev na zmeny charakteristických stavov vysielaného modulovaného signálu v daných okamihoch. Základnými určujúcimi parametrami je otvorenie oka a šírka oka. Otvorenie oka charakterizuje rozlíšiteľnosť  $\log 0$  a  $\log 1$ . Pravdepodobnosť vzájomnej zámene  $\log 0$  a  $\log 1$  je tým menšia, čím je otvorenie diagramu oka väčšie. Väčšia šírka oka poskytuje väčšiu toleranciu pre výber miesta, kde sa bude realizovať vzorkovanie. Z diagramu je možné kvalitatívne vyvodit' niektoré rušivé vplyvy, akým je napríklad symbolová interferencia.



Obrázok 8.4: Oko diagram digitálnej modulácie PSK [29].

### 8.2.6 BER

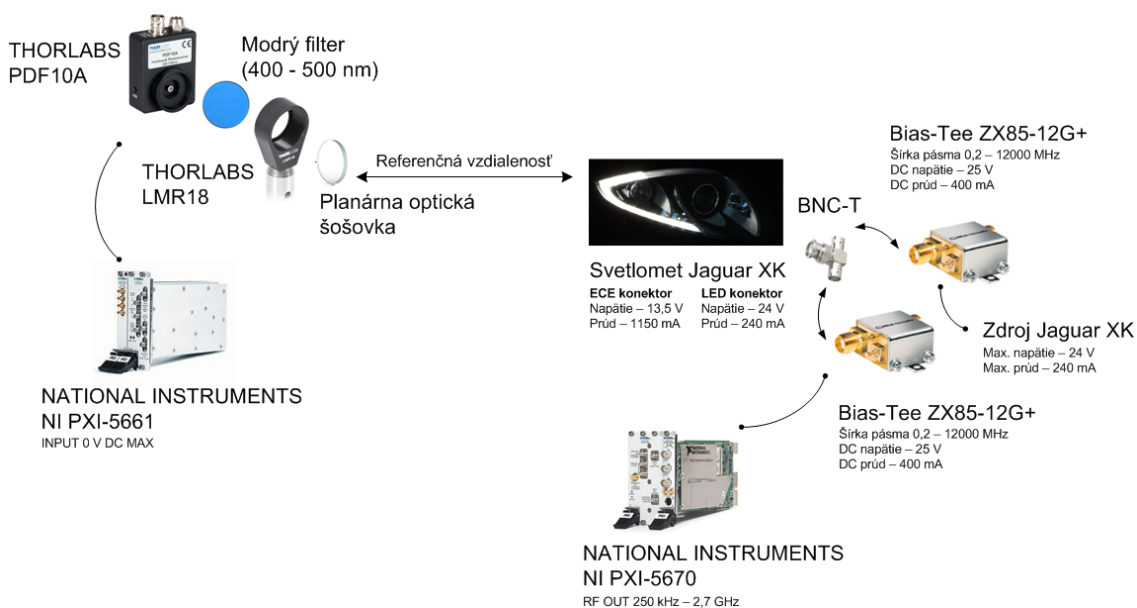
Meranie chybovosti patrí medzi základne metódy pre stanovenie kvality a spoľahlivosti digitálnych systémov. Jedná sa o vyjadrenie pravdepodobnosti chybné prenesených bitov. V prípade digitálnej komunikácie je chybovosť definovaná ako pomer počtu chybné prijatých bitov za sekundu k celkovému počtu prenesených bitov za sekundu.

Pri digitálnych systémoch sa na chybovosti podieľa najmä aditívny šum, ktorý je spôsobený hlavne tepelným šumom s presluchmi. Patria tu aj vlastnosti prenosového média a spôsob šírenia elektromagnetických vln v tomto médiu [28][35].

## 9 Testované modulácie

V rámci práce boli otestované dva typy pokročilých modulačných formátov M-PSK a M-QAM, pri ktorých boli stanovené prenosové parametre a šírka pásma. Testovanie prebiehalo s využitím dvoch navrhnutých systémov prenosu, a to M1 a M2.

Systém ďalej označovaný v práci ako M1 využíval na prijímacej strane samostatný detektor THORLABS PDF10A. Tento detektor však nie je určený pre bezvláknovú optickú komunikáciu z dôvodu malej plochy prijímacieho čipu. Z tohto dôvodu bol navrhnutý systém M2 posilnený o planárnu optickú šošovku, ktorá slúži pre usmernenie viditeľného optického žiarenia z DRL svetlometu na plochu čipu detektora. Dôležité pri tomto systéme bolo presné nastavenie ohniska šošovky vzhľadom k ploche čipu detektora THORLABS PDF10A.



Obrázok 9.1: *Bloková schéma zapojenia vysielacieho systému DRL Jaguar XK J.1 spolu s generátorom NI PXI-5661 a analyzátorom NI PXI-5670.*

Modulácie boli analyzované pri teplote okolia v miestnosti  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pričom meranie prebiehalo po 30 minútach prevádzky svetlometu, aby nedochádzalo k zahrievaniu LED zdrojov a následnému ovplyvneniu dosiahnutých výsledkov. Pri každej testovanej modulácii bol zaznamenaný vektorový diagram a oko diagram pre každú nosnú frekvenciu 1 – 10 MHz s referenčnou vzdialenosťou 0,1 – 7 m pri základnej symbolovej rýchlosti prenosu 100 kHz. Zároveň bola analyzovaná aj chybovosť prenosu v podobe parametra MER a  $\text{EVM}_{\text{RMS}}$ , a súčasne maximálne dosiahnuteľná rýchlosť prenosu.

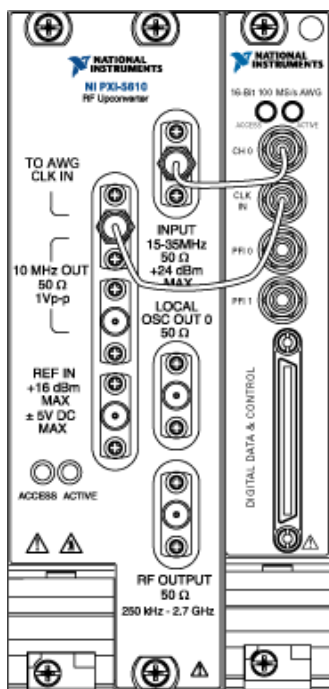
Generovanie a následná analýza modulácií bola realizovaná s využitím sofistikovaného softvéru LabVIEW 2014 s knižnicou funkcií Modulation Toolkit. LabVIEW predstavuje vývojový nástroj pre kompletný merací systém a ako celok zaisťuje riadenie celého procesu, zber meraných dát, analýzu a grafickú prezentáciu dosiahnutých výsledkov. Softvér pracuje

s hardwarovou časťou, a to s vektorovým signálovým generátorom PXI-5670 a analyzátorom PXI-5661, viď obr. 9.1 [33][34][36][37][39].

## 9.1 Signálový generátor RF VSG NI PXI-5670

Signálový generátor VSG NI PXI-5670 je možné v kombinácii s vývojovým prostredím LabVIEW doplneným o rozširujúcu knižnicu Modulation Toolkit využiť ku generovaniu potrebných testovacích signálov určených pre overenie vlastností digitálnych prenosových systémov. Funkčnosť testovacieho systému je závislá na jeho softvérovej časti a je teda možné jeho jednoduché prispôbenie v prípade nových požiadaviek.

RF vektor signálový generátor NI PXI-5670 predstavuje generátor užívateľsky definovaných priebehov AWG (Arbitrary Waveform Generator) pracujúci s rozlíšením 16 bitov, vzorkovacou rýchlosťou 100 MS/s, hĺbkou pamäte až 512 MB a reálnou šírkou pásma 20 MHz. S využitím digitálneho upconverteru je možné týmto modulom generovať v pásme 250 kHz až 2,7 GHz signál s použitím ľubovoľného modulačného formátu.



Obrázok 9.2: Zapojenie vektor signálového generátora RF VSG NI PXI-5670 (NI PXI-5610 – RF Upconverter, NI PXI-5421 – 100 MS/s AWG) [31].

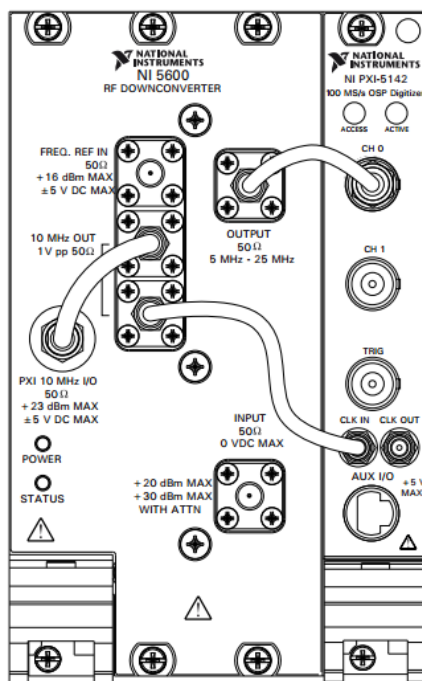
Vysielacia jednotka je zložená z dvoch častí, a to z upconverteru PXI-5610 a generátoru ľubovoľného priebehu PXI-5421. V prípade využitia oboch spomínaných meracích kariet súčasne, viď obr. 9.2, je táto meracia jednotka označovaná ako PXI-5670 generátor signálu. Generátor ľubovoľného priebehu (ARB) dokáže pracovať na maximálnej vzorkovacej frekvencii 100 MS/s. ARB pracuje s diskretným IQ priebehom, ktorý je vytvorený pomocou LabVIEW a následne vytvára nepretržitý priebeh IF (15 MHz – 35 MHz) signálu. S využitím

upconverter sú dáta vysielané na požadovanej RF frekvencií podľa zvolenej prenosovej technológií v rozmedzí 250 kHz – 2,7 GHz [31].

## 9.2 Signálový analyzátor RF VSA NI PXI-5661

Signálový analyzátor VSA NI PXI-5661 predstavuje kompaktné riešenie umožňujúce rýchle meranie digitálne modulovaných signálov v pásme 9 kHz až 2,7 GHz. Spolu s vývojovým prostredím LabVIEW s rozširujúcimi knižnicami Modulation Toolkit a Spectral Measurement Toolkit ponúka kompletnú vizualizáciu výsledkov merania. Vizualizácia je možná v obvyklých tvaroch akými sú 3D spektrogramy alebo vektorové diagramy pre analýzu digitálne modulovaných signálov.

Analyzátor sa rovnako ako generátor skladá z dvoch hlavných modulov. Prvým modulom je downconverter PXI-5600 a druhým je vysokorýchlostný digitizér PXI-5142. Downconverter pracuje pri frekvenciách v rozmedzí 250 kHz – 2,7 GHz a jeho úlohou je spracovanie prijatého signálu na IF (15 MHz). Digitizér pracuje na maximálnej vzorkovacej frekvencii 64 MS/s a je vybavený digitálnym downconverter čipom (DDC), ktorý môže realizovať digitálnu downkonverziu IF. V prípade nutnosti použitia väčšej šírky pásma ako 1,25 MHz sa downkonverzia realizuje softvérovo [32].



Obrázok 9.3: Zapojenie vektor signálového analyzátoru RF VSA NI PXI-5661 (NI PXI-5600 – RF Downconverter, NI PXI-5142 – 64 MS/s [32]).

## 9.3 Fázové kľúčovanie

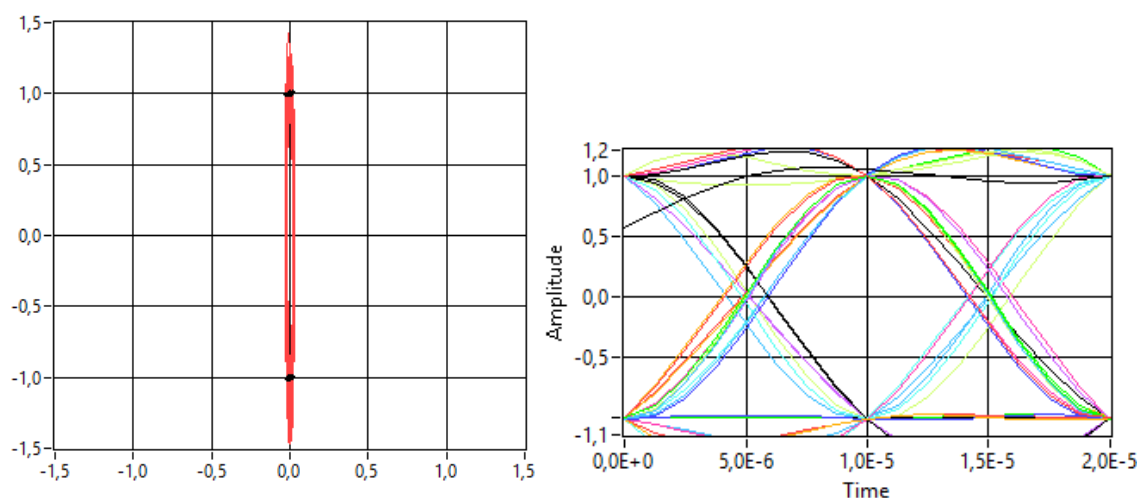
Fázové kľúčovanie PSK (Phase Shift Keying) prenáša informácie prostredníctvom zmeny fázy o vopred stanovenú hodnotu. Pri demodulácii je ale potrebné obnoviť fázu nosnej,



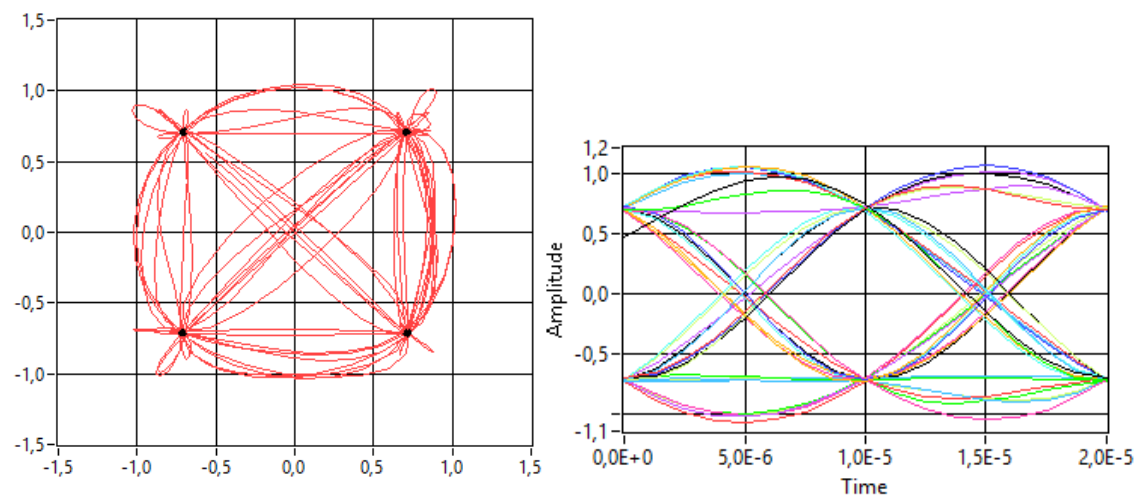
čo je v praxi komplikované, a preto sa využíva skôr modulácia DPSK (Differential Phase Shift Keying) patriaca do viacstavových modulácií označovaných ako M-PSK. Najdôležitejšia viacstavová modulácia PSK je modulácia QPSK, ktorá predstavuje optimálny kompromis medzi dobrou spektrálnou a výkonovou účinnosťou [30].

V prípade fázového kľúčovania je medzi jednotlivými stavmi dostatočne veľký odstup, a preto je táto modulácia odolnejšia voči šumu, rušeniu a ďalším nežiaducim vplyvom oproti moduláciám ASK alebo FSK.

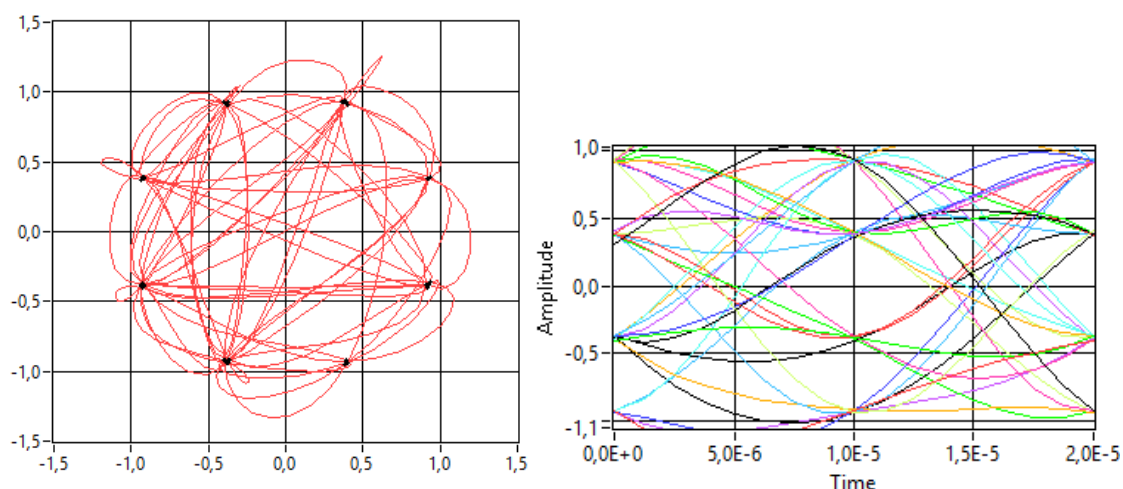
Testovanie viacstavových modulácií M-PSK bolo realizované s využitím modulácie BPSK, QPSK, 8-PSK a rovnako 16-PSK pri použití prenosového systému M1 a M2.



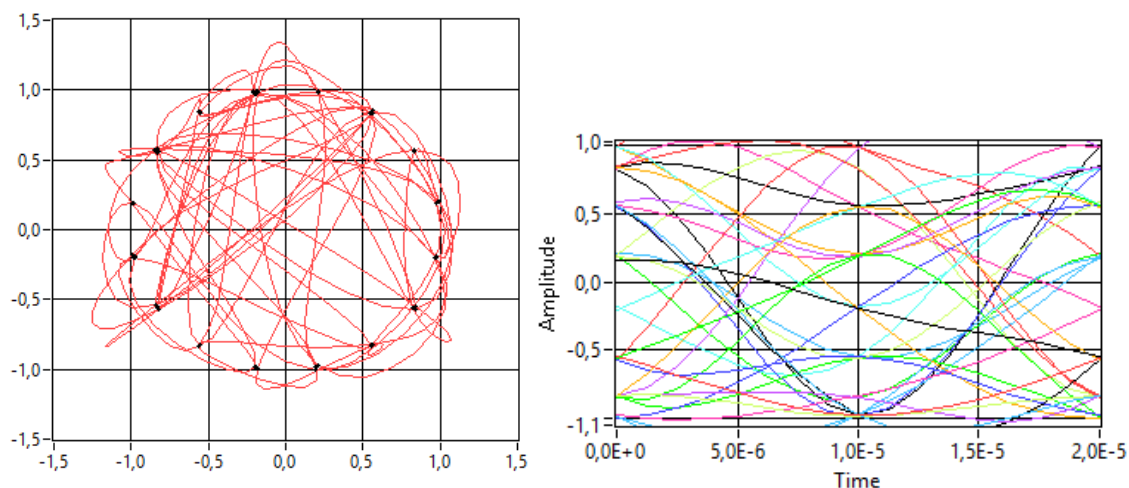
Obrázok 9.4: Vektorový diagram a oko diagram modulácie BPSK pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.



Obrázok 9.5: Vektorový diagram a oko diagram modulácie QPSK pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.



Obrázok 9.6: Vektorový diagram a oko diagram modulácie 8-PSK pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.



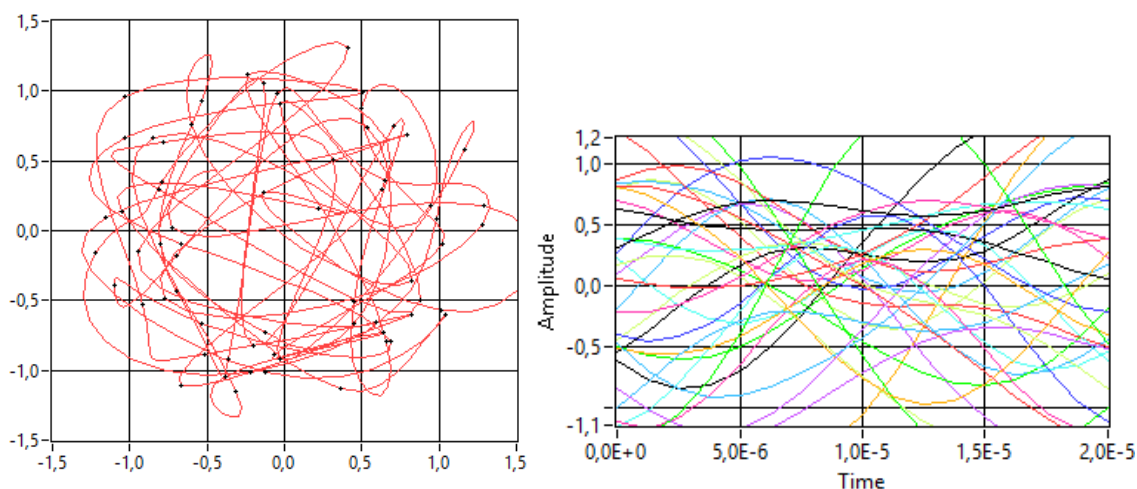
Obrázok 9.7: Vektorový diagram a oko diagram modulácie 16-PSK pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.

Kompletné spracované výsledky testovania systému M1 a M2 sú uvedené v prílohe B a elektronickej prílohe. Na obr. 9.4 až obr. 9.7 sú zobrazené vektorové a oko diagramy M-PSK modulácií pri symbolovej rýchlosti 100 kHz s referenčnou vzdialenosťou 1 m.

Vyhodnotenie jednotlivých modulácií z pohľadu možnosti prenosu bolo realizované prostredníctvom stupňa rozpadu vektorového a oka diagramu. Rozpad nastával splynutím jednotlivých stavov alebo celkovým rozpadom vektorového diagramu, viď obr. 9.8.

Systém M2 zaznamenal rozpad spojenia iba v prípade modulácie 16-PSK pri nosnej frekvencii 10 MHz a maximálnej referenčnej vzdialenosti 7 m. V prípade ostatných modulácií bol prenos realizovateľný pre všetky nosné frekvencie a referenčné vzdialenosti. Systém M1 vykazoval rozpad spojenia pre nosnú frekvenciu 10 MHz už na vzdialenosť 10 cm, pričom pri

vzdialenosti 1,5 m bola schopná komunikácie iba modulácia BPSK a QPSK s nosnou frekvenciou 1 MHz a 2 MHz.

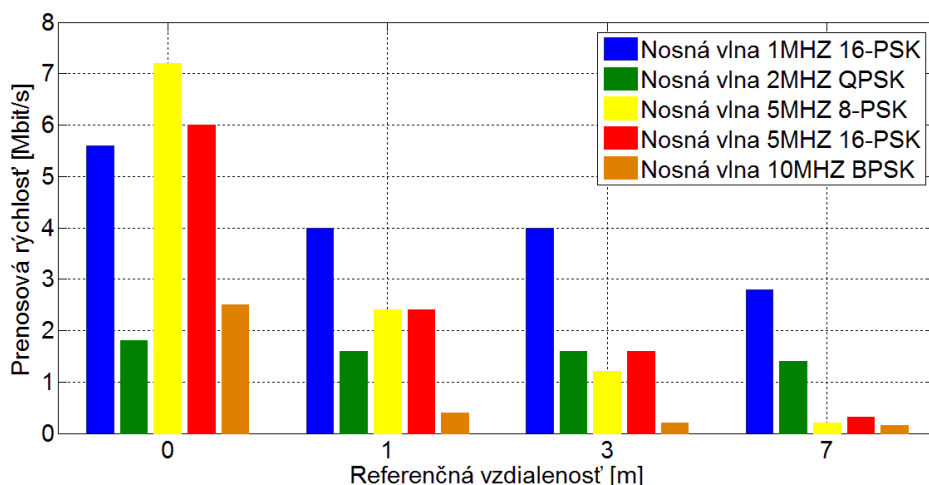


Obrázok 9.8: Rozpad vektorového a oko diagramu modulácie 16-PSK pri nosnej frekvencii 10 MHz a referenčnej vzdialenosti 7 m.

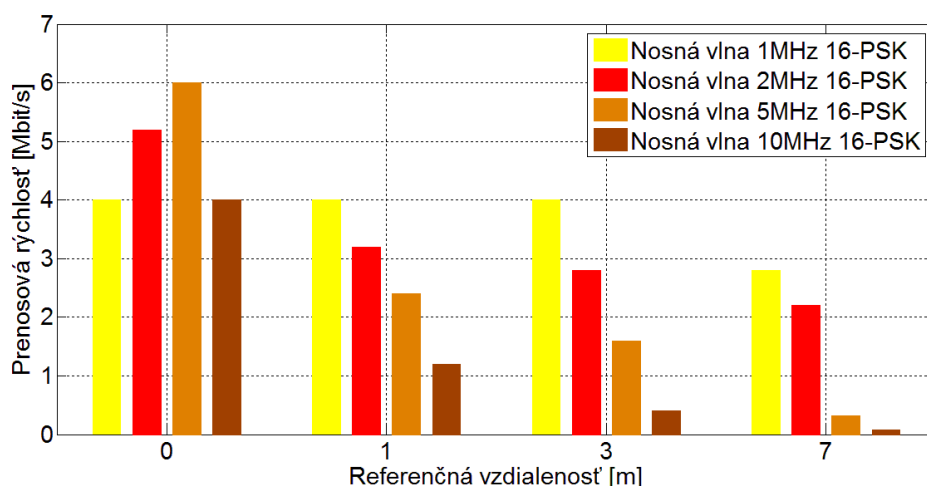
### 9.3.1 Prenosová rýchlosť M-PSK

Prenosová rýchlosť bola vypočítaná z maximálnej dosiahnutej symbolovej rýchlosti pre jednotlivé nosné frekvencie a referenčné vzdialenosti M-PSK modulácií, vid' vzťah 8.5. Kompletne dosiahnuté výsledky pre testovaný systém M1 a M2 sú uvedené a spracované v prílohe B a elektronickej prílohe.

Na obr. 9.9 sú zobrazené dosiahnuté prenosové rýchlosti vybraných M-PSK modulácií pri použití systému M2. Ďalší obr. 9.10 analyzuje vplyv nosnej frekvencie 1 - 10 MHz na prenosovú rýchlosť modulácie 16-PSK.



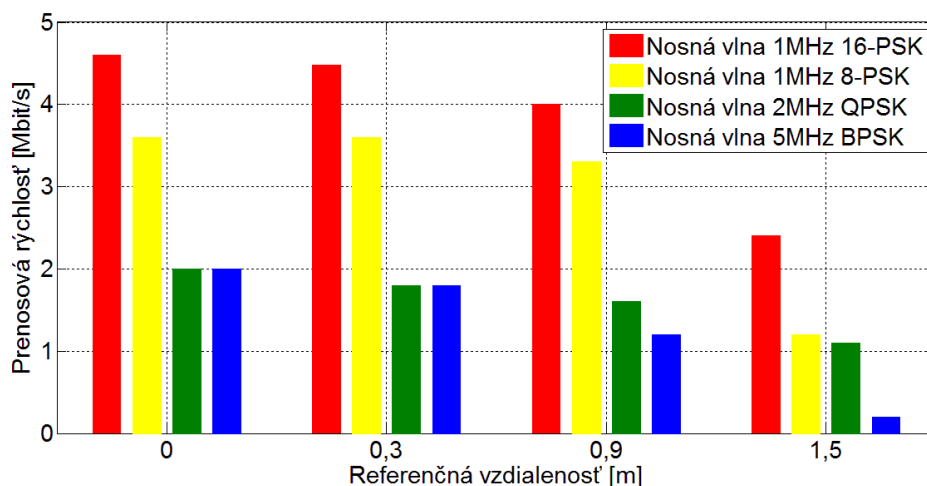
Obrázok 9.9: Analyzované prenosové rýchlosti vybraných M-PSK modulácií systému M2 s využitím nosnej frekvencie 1- 10 MHz.



Obrázok 9.10: *Analýza prenosovej rýchlosti modulácie 16-PSK systému M2 pri zmene nosnej frekvencie 1- 10 MHz.*

Na základe dosiahnutých výsledkov je zrejmé, že najvyšších prenosových rýchlostí dosahovali viacstavové modulácie s vyšším počtom stavov, konkrétne modulácia 8-PSK s nosnou frekvenciou 5 MHz pri vzdialenosti detektora 0,1 m od DRL svetlometu a to 7,2 Mbit/s. Viacstavové modulácie BPSK a QPSK s menším počtom stavov dosahovali viditeľne nižších prenosových rýchlostí, a to približne 2 Mbit/s pri nosnej frekvencii 1 MHz.

Pri zväčšovaní vzdialenosti detektora optického signálu od DRL svetlometu vykazovali viacstavové modulácie 8-PSK a 16-PSK značný pokles prenosových rýchlostí. V tomto smere dosahovala lepších prenosových vlastností viacstavová modulácia QPSK, ktorá vykazovala stabilnú prenosovú rýchlosť v oblasti 2 Mbit/s pri nosnej frekvencii 1 MHz.



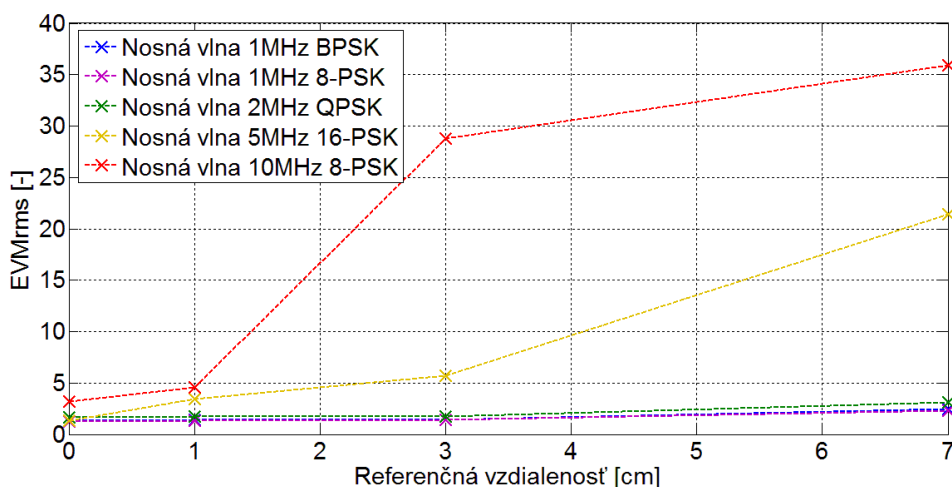
Obrázok 9.11: *Analyzované prenosové rýchlosti vybraných M-PSK modulácií systému M1 s využitím nosnej frekvencie 1- 5 MHz.*

Na základe celkovej analýzy a následného porovnania výsledkov systému M1 a M2 môžeme konštatovať, že systémy dosahujú odlišných prenosových vlastností. Hlavný rozdiel

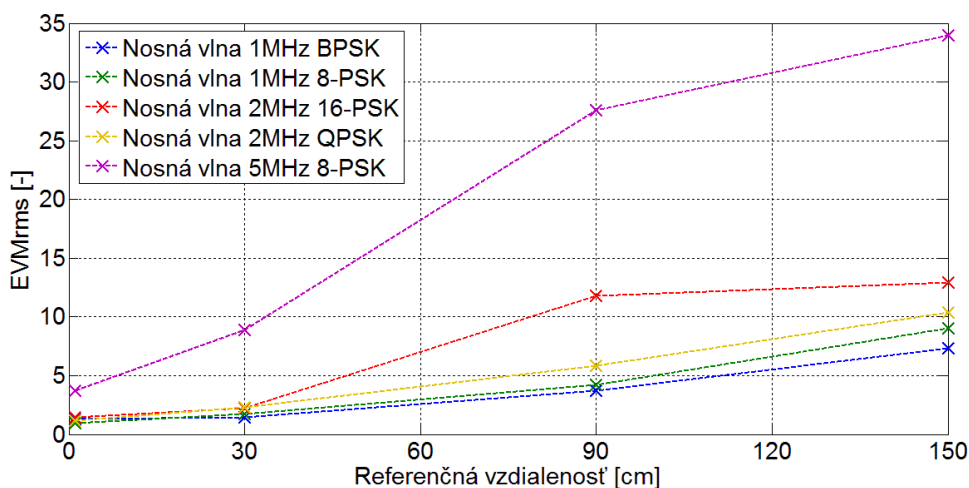
nastáva pri maximálnej dosiahnuteľnej vzdialenosti prenosu, kde je systém M1 schopný komunikovať na vzdialenosť 1,5 m do nosnej frekvencie 2 MHz. V prípade systému M2 je prenos realizovateľný pri všetkých testovaných referenčných vzdialenostiach 0,1 – 7 m a nosných frekvenciách 1 – 10 MHz modulácií M-PSK.

### 9.3.2 Chybovosť M-PSK

V rámci testovania chybovosti prenosu boli zaznamenané hodnoty parametru MER a  $EVM_{RMS}$  vzhľadom k jednotlivým nosným frekvenciám a referenčným vzdialenostiam. Kompletne dosiahnuté výsledky pre testovaný systém M1 a M2 sú uvedené a spracované v prílohe B a elektronickej prílohe.

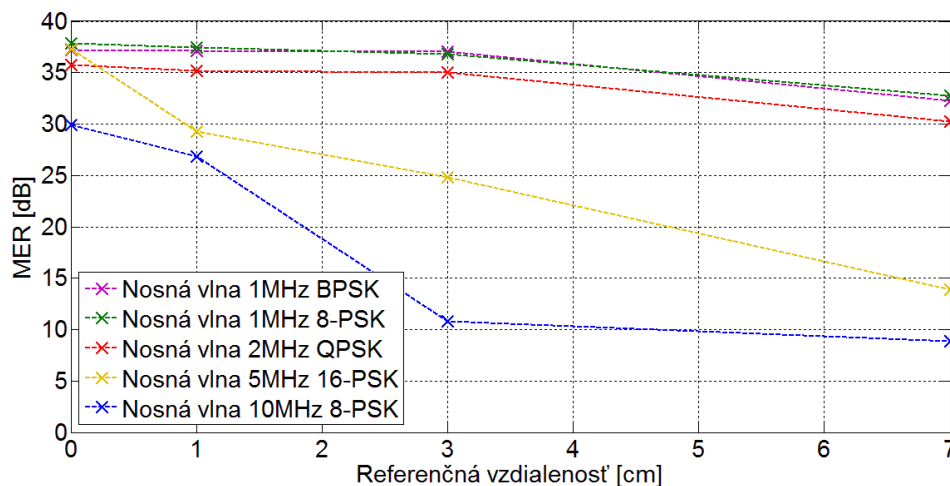


Obrázok 9.12: Porovnanie parametru  $EVM_{RMS}$  vybraných M-PSK modulácií systému M2 s využitím nosnej frekvencie 1- 10 MHz.

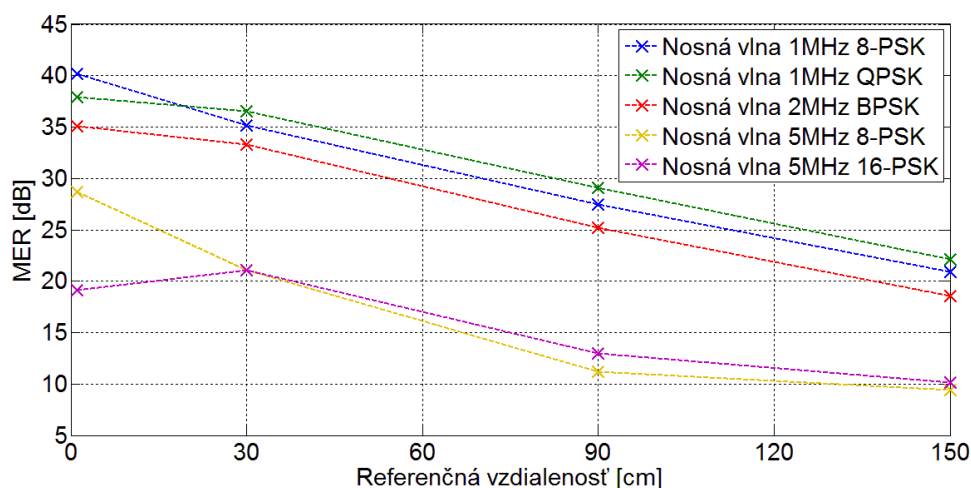


Obrázok 9.13: Porovnanie parametru  $EVM_{RMS}$  vybraných M-PSK modulácií systému M1 s využitím nosnej frekvencie 1- 5 MHz.

Obr. 9.12 a obr. 9.13 porovnáva parameter amplitúdy chybového vektoru  $EVM_{RMS}$  v prípade M-PSK modulácií s využitím systému M1 a M2. Systém M2 dosahuje oproti systému M1 viditeľne lepších vlastností v oblasti šumu a skreslenia pri testovaných moduláciách.



Obrázok 9.14: Porovnanie parametru MER vybraných M-PSK modulácií systému M2 s využitím nosnej frekvencie 1- 10 MHz.



Obrázok 9.15: Porovnanie parametru MER vybraných M-PSK modulácií systému M1 s využitím nosnej frekvencie 1- 5 MHz.

Na obr. 9.14 a obr. 9.15 sú porovnané dosiahnuté výsledky parametru modulačnej chyby prenosu MER v prípade M-PSK modulácií s využitím systému M1 a M2. Systém M1 vykazuje horší pomer signálu a šumu v porovnaní so systémom M2.

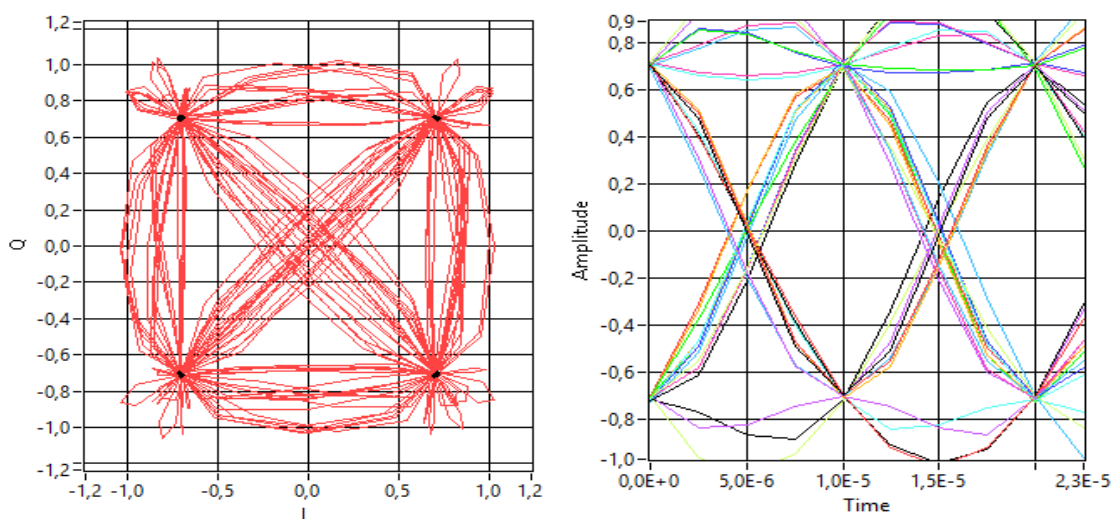
## 9.4 Kvadrátúrna amplitúdová modulácia

Kvadrátúrna amplitúdová modulácia QAM (Quadrature Amplitude Modulation) využíva amplitúdové kľúčovanie na dve rôzne nosné. Obidve nosné musia mať rovnakú nosnú

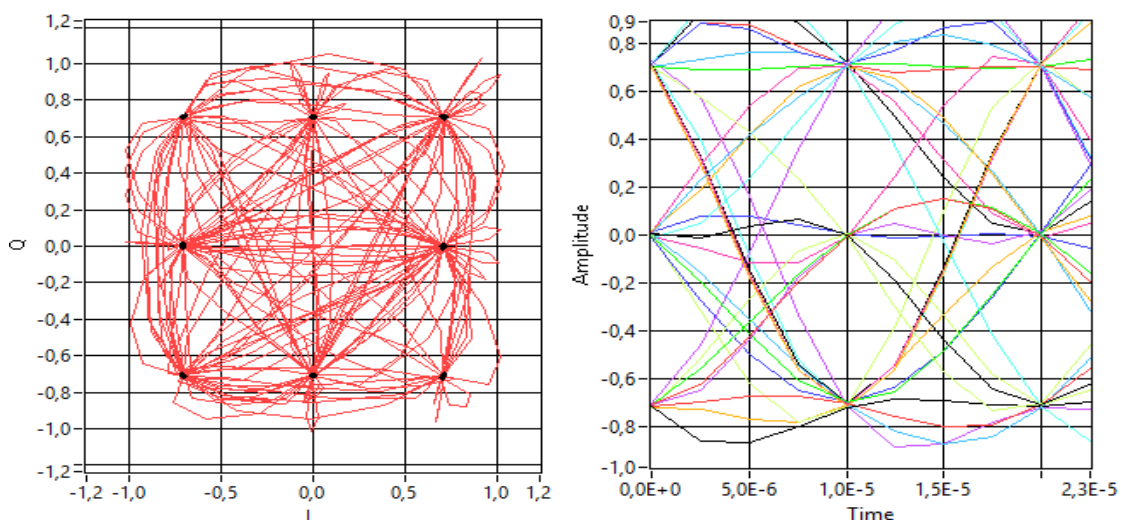
frekvenciu a musia byť vzájomne ortogonálne (funkcia sínus a kosínus). Demodulovaním sa obnovuje nosná a vzorkuje sa signál v určený okamih.

QAM moduláciu je možné charakterizovať aj ako kombináciu amplitúdového a fázového kľúčovania. Jednotlivé stravy sú teda rozlišované podľa amplitúdy a fázy nosnej. Kvadratúrna amplitúdová modulácia patrí medzi viacstavové modulácie a v praxi sa bežne používa 4-QAM až 2048-QAM [30].

Testovanie viacstavových modulácií M-QAM bolo realizované s využitím modulácie 4-QAM až 256-QAM pri použití systému M2, ktorý na základe analýzy dosiahnutých výsledkov M-PSK modulácií vykazoval lepších prenosových vlastností.

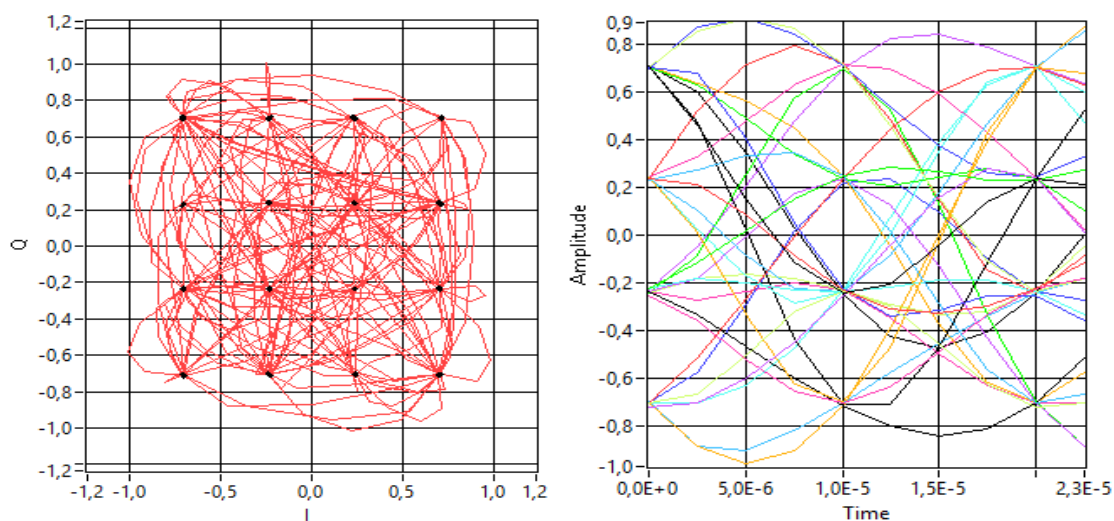


Obrázok 9.16: Vektorový diagram a oko diagram modulácie 4-QAM pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.

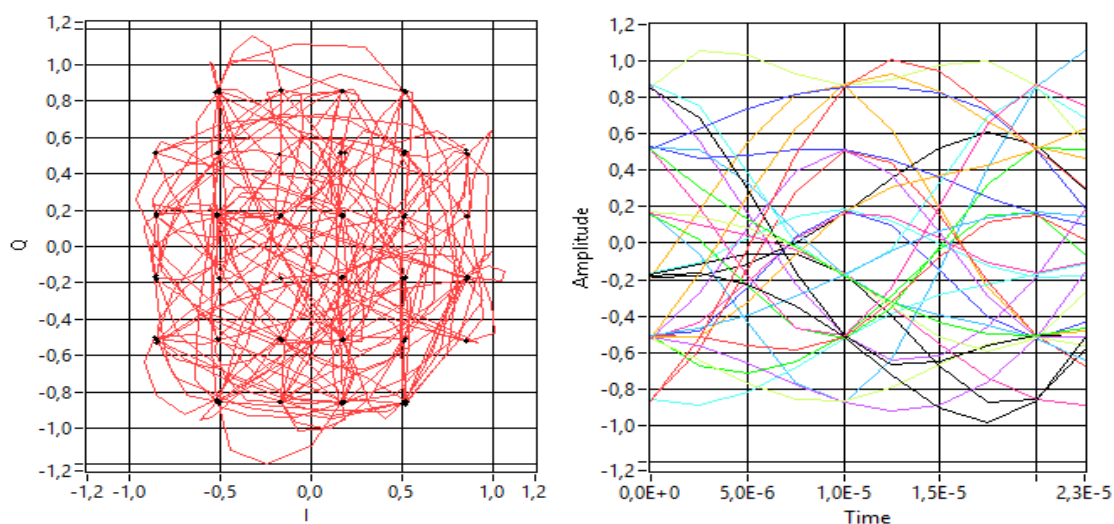


Obrázok 9.17: Vektorový diagram a oko diagram modulácie 8-QAM pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.





Obrázok 9.18: Vektorový diagram a oko diagram modulácie 16-QAM pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.



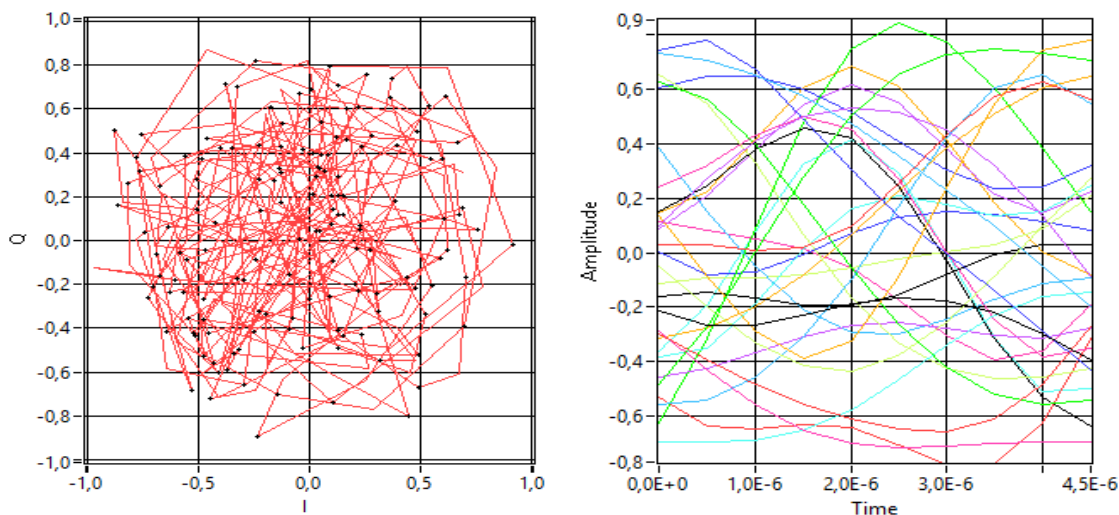
Obrázok 9.19: Vektorový diagram a oko diagram modulácie 32-QAM pri nosnej frekvencii 1 MHz a referenčnej vzdialenosti 1 m.

Kompletné spracované výsledky testovania systému M2 v rámci M-QAM modulácií sú uvedené v prílohe B a elektronickej prílohe. Obr. 9.16 až obr. 9.19 zobrazuje vektorové diagramy a oko diagramy M-QAM modulácií pri základnej symbolovej rýchlosti 100 kHz s referenčnou vzdialenosťou 1 m od zdroja optického žiarenia DRL.

Vyhodnotenie jednotlivých modulácií z pohľadu možnosti prenosu bolo opäť, ako v prípade M-PSK modulácií, realizované prostredníctvom stupňa rozpadu vektorového a oko diagramu. Rozpad v tomto prípade nastával celkovým rozhodnutím alebo splynutím stavov vektorového alebo oko diagramu, viď obr. 9.20. Rovnako v niektorých prípadoch dochádzalo k ojedinelému prerušeniu prenosu, ktoré som vyhodnotil ako rozpad spojenia.



Modulácie M-QAM so systémom M2 dosiahli rozpad spojenia iba v prípade modulácie 256-QAM pri nosnej frekvencii 5 MHz a 10 MHz a maximálnej referenčnej vzdialenosti 7 m, kedy systém nedokázal realizovať prenos informácií. Ostatné testované modulácie M-QAM boli schopné realizovať prenos pre všetky nosné frekvencie a referenčné vzdialenosti.

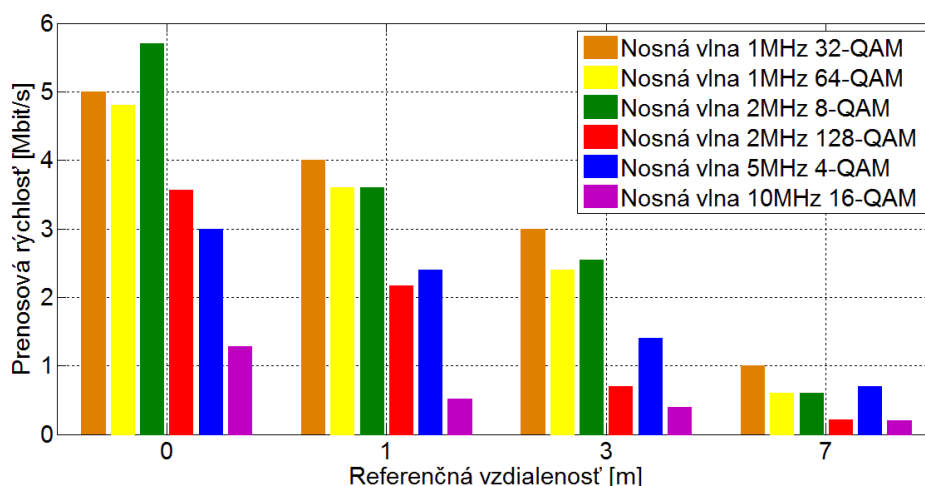


Obrázok 9.20: Rozpad vektorového a oko diagramu modulácie 256-QAM pri nosnej frekvencii 10 MHz a referenčnej vzdialenosti 7 m.

#### 9.4.1 Prenosová rýchlosť M-QAM

Kompletné dosiahnuté a spracované prenosové rýchlosti modulácií M-QAM s využitím systému M2 sú uvedené v prílohe B a elektronickej prílohe.

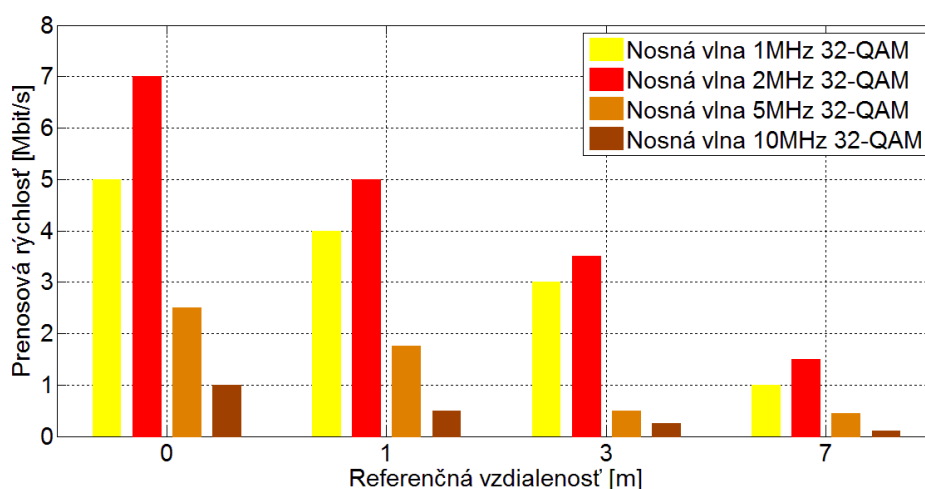
Na obr. 9.21 sú zobrazené testované prenosové rýchlosti vybraných M-QAM modulácií pri použití systému M2. Nasledujúci obr. 9.22 analyzuje vplyv nosnej frekvencie 1- 10 MHz na prenosovú rýchlosť modulácie 32-QAM.



Obrázok 9.21: Analyzované prenosové rýchlosti vybraných M-QAM modulácií systému M2 s využitím nosnej frekvencie 1- 10 MHz.

Analýza dosiahnutých výsledkov preukázala, že rovnako ako v prípade M-PSK modulácií dosahujú modulácie M-QAM vyšších prenosových rýchlostí pri použití viacstavových modulácií s vyšším počtom stavov, konkrétne sa jedná o moduláciu 64-QAM s nosnou frekvenciou 2 MHz pri vzdialenosti detektora 0,1 m od DRL svetlometu, a to 7,8 Mbit/s. Modulácia 4-QAM dosahovala oproti moduláciám s vyšším počtom stavov menších prenosových rýchlostí, a to približne 2,3 Mbit/s pri nosnej frekvencii 1 MHz a vzdialenosti detektora od svetlometu 0,1 m, vid' obr. 9.21.

So zväčšujúcou sa vzdialenosťou detektora optického signálu od DRL svetlometu vykazovali modulácie M-QAM viditeľný pokles prenosových rýchlostí. V tomto smere dosahovali lepších prenosových vlastností modulácie s nižším počtom stavov, ktoré vykazovali stabilnú prenosovú rýchlosť v oblasti 2 – 3 Mbit/s pri nosnej frekvencii 1 MHz.



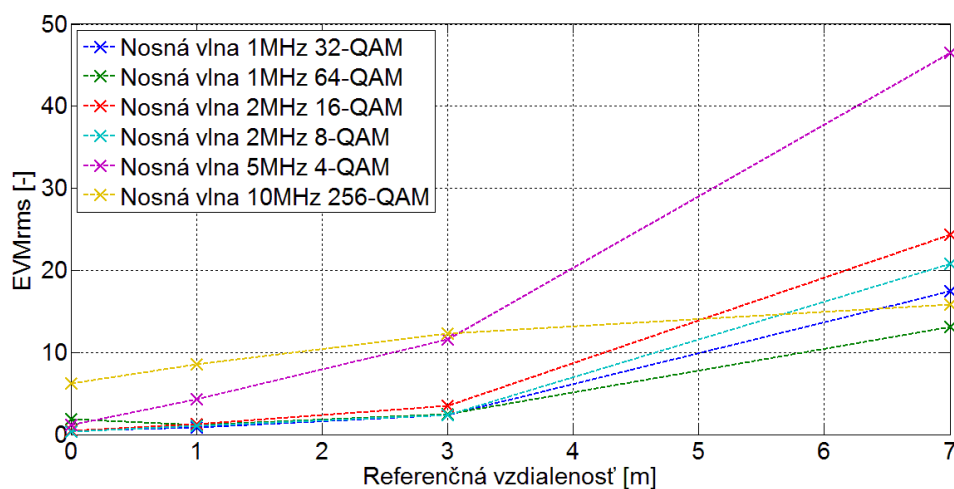
Obrázok 9.22: Analýza prenosovej rýchlosti modulácie 32-QAM systému M2 pri zmene nosnej frekvencie 1- 10 MHz.

Modulácie M-QAM dosahujú v prípade zväčšujúcej sa nosnej frekvencie vyšších prenosových rýchlostí, ale zároveň sú náchylnejšie na vzdialenosť detektora optického signálu od DRL svetlometu, kedy sa prenosová rýchlosť znižuje markantnejšie, vid' obr. 9.22.

#### 9.4.2 Chybovosť M-QAM

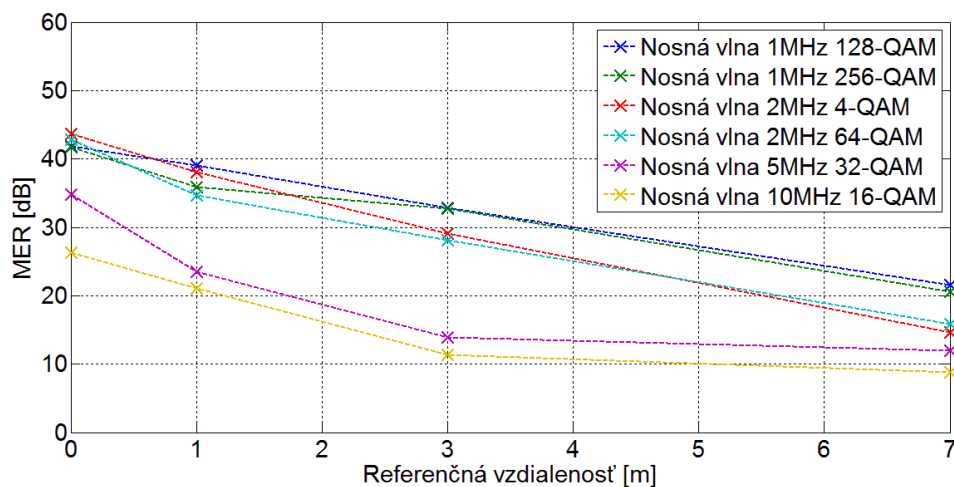
Testovanie chybovosti prenosu bolo rovnako ako v prípade M-PSK modulácií realizované prostredníctvom analýzy parametra MER a  $EVM_{RMS}$  vzhľadom k jednotlivým nosným frekvenciám a referenčným vzdialenostiam. Kompletne dosiahnuté a spracované výsledky sú uvedené v prílohe B a elektronickej prílohe.

Na obr. 9.23 je analyzovaný parameter amplitúdy chybového vektora  $EVM_{RMS}$  vybraných modulácií M-QAM. Viditeľne lepších vlastností v oblasti šumu a skreslenia dosahujú modulácie v prípade menších vzdialenostiach detektora optického signálu od DRL svetlometu.



Obrázok 9.23: Porovnanie parametru  $EVM_{RMS}$  vybraných M-QAM modulácií systému M2 s využitím nosnej frekvencie 1- 10 MHz.

Na obr. 9.24 sú analyzované dosiahnuté výsledky parametra modulačnej chyby prenosu MER v prípade M-QAM modulácií. Rovnako ako v prípade parametru  $EVM_{RMS}$  dosahujú lepší pomer signálu a šumu modulácie pri menšej vzdialenosti detektora optického signálu od DRL svetlometu.






Obrázok 9.24: Porovnanie parametru MER vybraných M-QAM modulácií systému M2 s využitím nosnej frekvencie 1- 10 MHz.

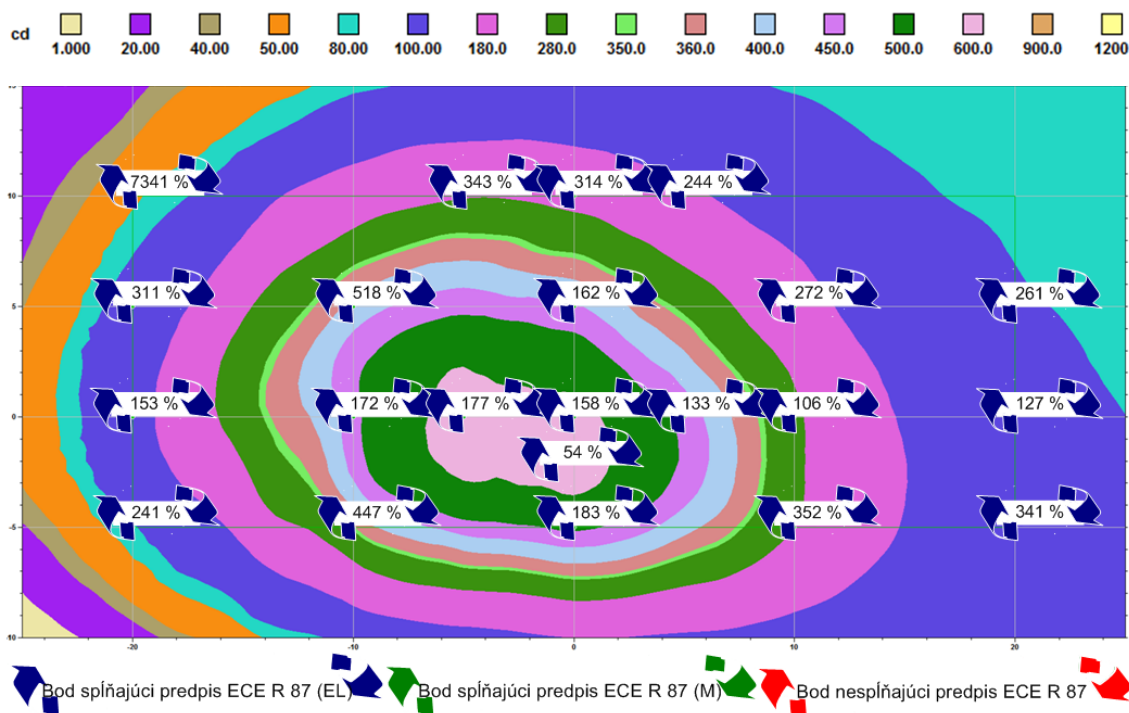
## 10 Vyhodnotenie optických vlastností DRL svetlometu pri použití pokročilých modulačných formátov

Vyhodnotenie optických vlastností DRL svetlometu Jaguar XK bolo realizované na základe porovnania dosiahnutých výsledkov z prvej fázy testovania svetlometu s pôvodnou riadiacou elektronikou a následného testovania s nasadením navrhnutého vysielacieho systému J.1 využívajúceho pokročilé modulačné formáty. Konkrétne sa jedná o analýzu výsledkov fotometrických veličín a homogenity vyžarovania DRL a štatistickú analýzu vplyvu nosnej frekvencie na optický výkon DRL svetlometu.

### 10.1 Vyhodnotenie fotometrických veličín optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK

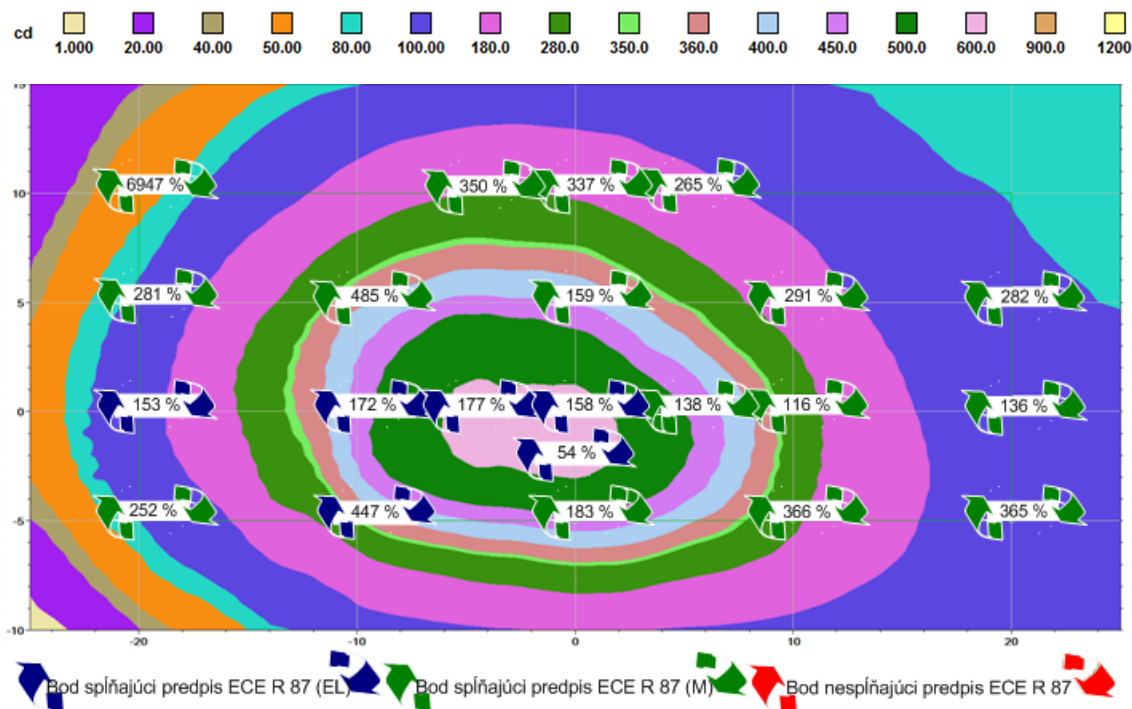
Fotometrické veličiny optického žiarenia DRL svetlometu s pôvodnou riadiacou elektronikou a nasadeným vysielacím systémom J.1 boli vyhodnotené vzhľadom k splneniu zákonných požiadaviek predpisu ECE R 87.

Vyhodnocovací člen  predstavuje v isocandelovej mape bod spĺňajúci predpis ECE R 87, v ktorom nedošlo k žiadnej štatisticky významnej zmene oproti meraniu s pôvodnou riadiacou elektronikou. Ďalší vyhodnocovací člen  označuje bod, pri ktorom nastala štatisticky významná zmena, ale bod zároveň spĺňa predpis ECE R 87. Posledný vyhodnocovací člen  reprezentuje bod, ktorý nespĺňa predpis ECE R 87.



Obrázok 10.1: Isocandelová mapa DRL svetlometu Jaguar XK s pôvodnou riadiacou elektronikou.

Na obr. 10.1 je zobrazená isocandelová mapa DRL svetlometu Jaguar XK s pôvodnou riadiacou elektronikou, ktorá spĺňa predpis ECE R 87, viď obr. 4.11 vo všetkých testovaných bodoch a svetlomet teda spĺňa zákonné požiadavky pre automobilové osvetlenie.



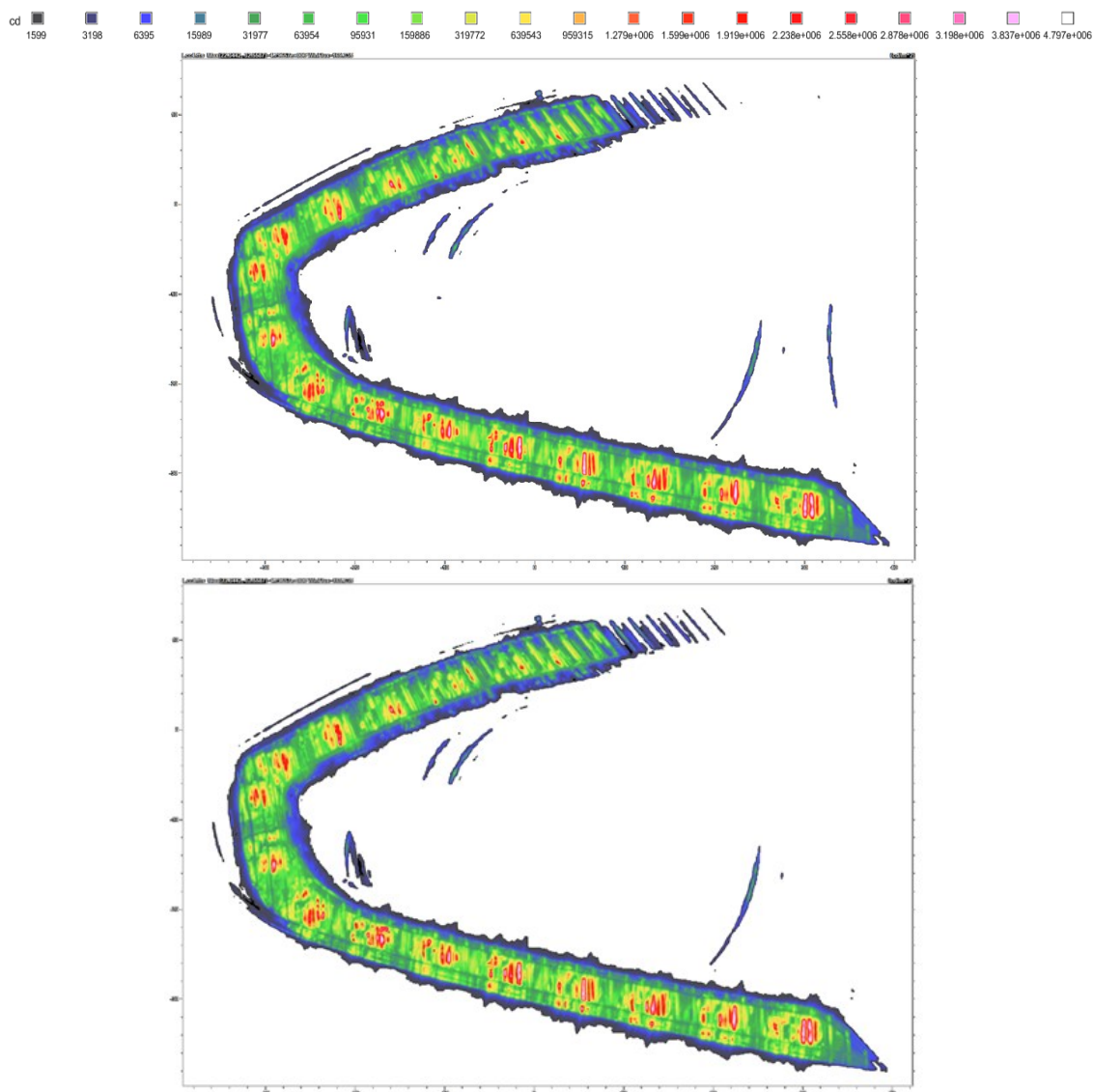
Obrázok 10.2: Isocandelová mapa DRL svetlometu Jaguar XK s nasadeným vysielacím systémom J.1 a modulačným formátom 64-QAM.

Isocandelová mapa, viď obr. 10.2 zobrazuje výsledok testovania fotometrických veličín funkcie DRL s využitím navrhnutého konceptu vysielacieho systému J.1. Ten využíva pre optický prenos dát pokročilý modulačný formát 64-QAM s nosnou frekvenciou 2 MHz, ktorý bol vybraný na základe testovania parametrov prenosu v predchádzajúcej kapitole.

Výsledná isocandelová mapa a protokol merania vykazujú štatisticky nevýznamné zmeny v jednotlivých bodoch, ktoré však zároveň spĺňajú predpis ECE R 87, a teda funkcia DRL spĺňa zákonné požiadavky pre automobilové osvetlenie vo všetkých testovaných bodoch. Minimálne zmeny fotometrických veličín sú pravdepodobne spôsobené zásahom do reflektorovej časti svetlometu, ktorá bola nutná z hľadiska nasadenia systému J.1 a rovnako miernym kolísaním prevádzkovej teploty svetlometu.

## 10.2 Vyhodnotenie homogenity optického žiarenia denného svietenia Jaguar XK

Homogenita optického žiarenia DRL svetlometu s pôvodnou riadiacou elektronikou a nasadeným vysielacím systémom J.1 boli vyhodnotené vzhľadom k záväzným stanoveným požiadavkám zákazníka, kde typický pomer medzi najsilnejším a najslabším bodom danej funkcie nemôže byť väčší ako 1:3.



Obrázok 10.3: *Jasová mapa denného svietenia Jaguar XK s pôvodnou riadiacou elektronikou svetlometu a nasadeným vysielačím systémom J.1 (64-QAM).*

Podľa jasovej mapy DRL svetlometu s pôvodnou riadiacou elektronikou, vid' obr. 10.3a a priloženej dokumentácie dosahuje bod MAX (X: 22,3; Y: -32,6) najvyššiu hodnotu jasu, a to 4,797 Mcd. Výsledný pomer medzi najsilnejším a najslabším bodom funkcie je v oblasti tolerancie zákazníka, a teda DRL (EL) spĺňa podmienku homogenity.

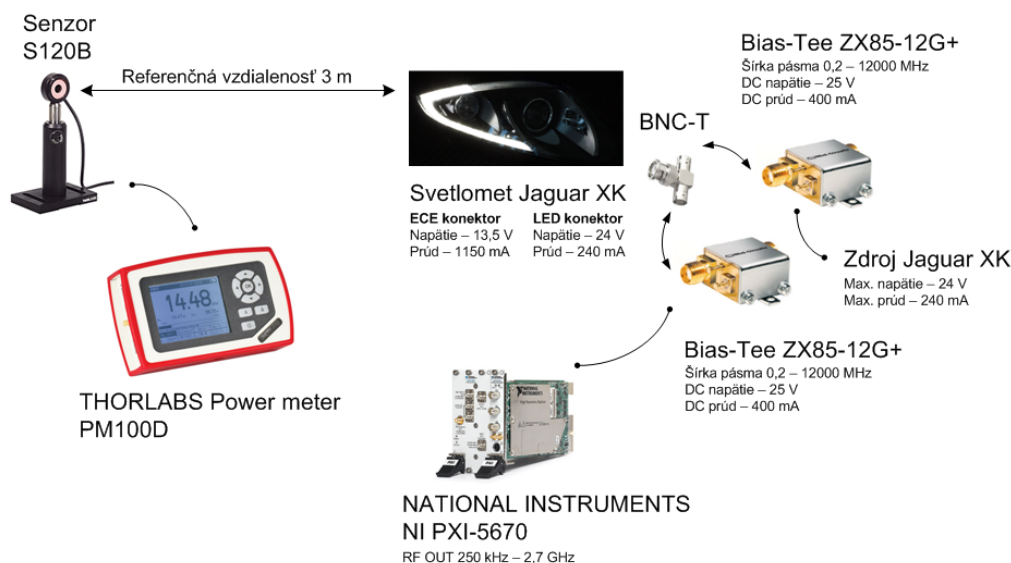
Nasledujúca jasová mapa, vid' 10.3b predstavuje analýzu DRL s využitím navrhnutého integrovaného konceptu vysielačieho systému J.1, ktorý využíva moduláciu 64-QAM s nosnou frekvenciou 2 MHz. Podľa výslednej jasovej mapy a priloženej dokumentácie dosahuje bod MAX (X: 22,3; Y: -32,6) najvyššiu hodnotu jasu, a to 4,705 Mcd. Výsledný pomer medzi najsilnejším a najslabším bodom funkcie DRL (M) je v oblasti tolerancie zákazníka 1:3, a teda spĺňa podmienku homogenity, pričom nedochádza k žiadnej štatisticky významnej zmene.



### 10.3 Štatistická analýza nosnej frekvencie

Cieľom štatistickej analýzy nosnej frekvencie v závislosti na použitých pokročilých modulačných formátoch bolo zistiť mieru významnosti poklesu optického výkonu DRL svetlometu Jaguar XK, ktorá by pri reálnom nasadení v automobilovom priemysle mohla znamenať negatívne ovplyvnenie danej funkcie svetlometu a spôsobiť dopravnú nehodu.

Experimentálne meracie pracovisko bolo skonštruované obdobne ako pracovisko pre testovanie modulačných formátov, ale namiesto optického fotodetektora THORLABS PDF10A a signálového analyzátora VSA NI PXI-5661 bol využitý kremíkový senzor S120B určený pre meranie optického výkonu v kombinácii so zapojením power metra THORLABS PM100D, vid' obr. 10.4.



Obrázok 10.4: *Bloková schéma experimentálneho pracoviska pre testovanie poklesu optického výkonu DRL Jaguar XK.*

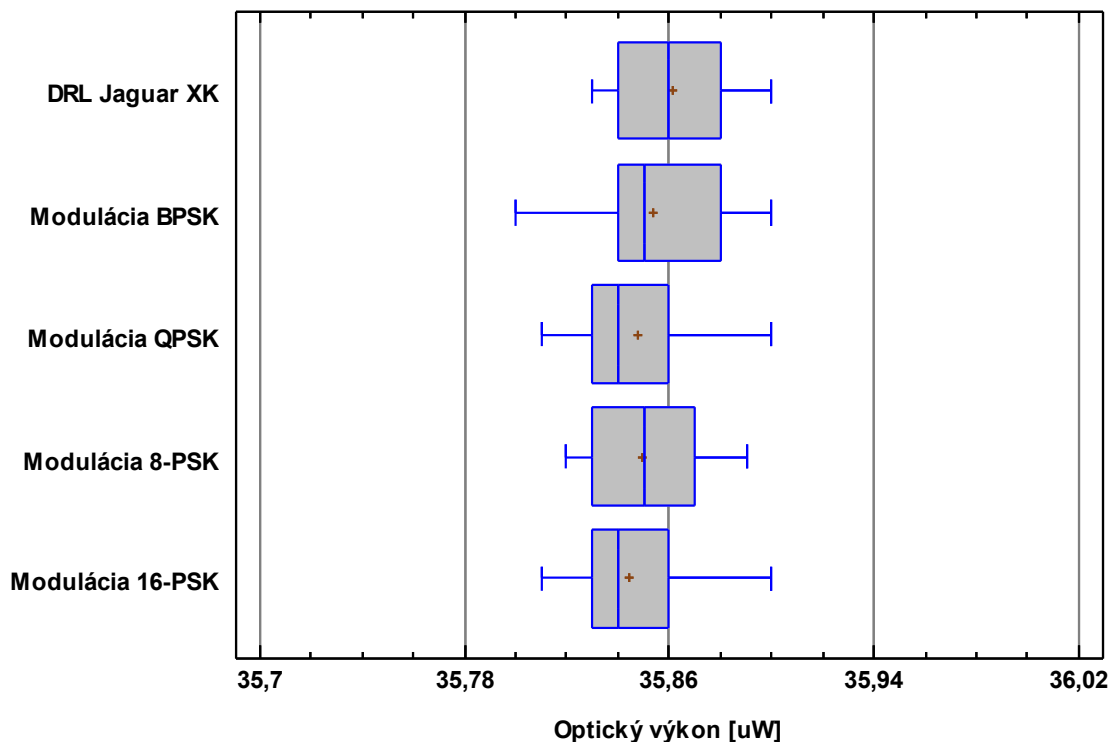
Testovanie optického výkonu prebehlo v laboratóriu temná miestnosť pri nastavenej vlnovej dĺžke 450 nm na zariadení PM100D a referenčnej vzdialenosti optického senzora S120B od svetlometu 3 m. V prvej fáze merania som analyzoval kolísanie optického výkonu DRL v časovom úseku 30 minút, aby som získal štatistiky porovnateľný výstup. Následná analýza jednotlivých pokročilých modulačných formátov prebehla po stanovenom časovom odstupe 30 minút vzhľadom k zahrievaniu svetlometu a vplyvu teploty na optický výkon LED segmentov. Každá modulácia bola otestovaná pri základnej symbolovej rýchlosti 100 kHz a nosnej frekvencii 1 MHz – 1 GHz. Kompletne dosiahnuté výsledky jednotlivých testov modulácií sú uvedené v elektronickej prílohe.

Vstupný štatistický súbor určený pre analýzu štatisticky významného rozdielu tvorí 61 hodnôt optického výkonu pri každom testovanom modulačnom formáte. Dáta boli analyzované a vyhodnotené prostredníctvom sofistikovaného analyzačného nástroja Statgraphics Centurion XVII. Výstupom programu sú krabicové grafy a numerická variabilná analýza dosiahnutých

výsledkov. Pre jednoduchšiu interpretáciu je priemerný optický výkon u jednotlivých modulácií vyjadrený percentuálne.

### 10.3.1 Štatistická analýza modulácií M-PSK

V rámci štatistickej analýzy modulačných formátov M-PSK boli porovnávané modulácie BPSK, QPSK, 8-PSK a 16-PSK v závislosti na nosnej frekvencii 1 MHz – 1 GHz.



Obrázok 10.5: Krabicové grafy testovaných M-PSK modulácií vzhľadom k zmene nosnej frekvencie 1 MHz – 1 GHz.

Na obr. 10.5 je zobrazená štatistická analýza M-PSK modulácií prostredníctvom krabicového grafu a následná tabuľka 10.1 udáva výsledky numerickej variabilnej analýzy.

Tabuľka 10.1: Štatistické spracovanie výsledkov závislosti optického výkonu DRL Jaguar XK na použitej modulácii M-PSK.

Charakteristika merania	Typ modulácie M-PSK				
	-	BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK
Počet	61	61	61	61	61
Smerodajná odchýlka	0,019	0,025	0,022	0,023	0,021
Priemer [μW]	35,86	35,86	35,853	35,86	35,853
Priemer [%]	100 %	100 %	99,98 %	100 %	99,98 %
Minimum [μW]	35,83	35,8	35,81	35,82	35,81
Maximum [μW]	35,9	35,9	35,9	35,89	35,9

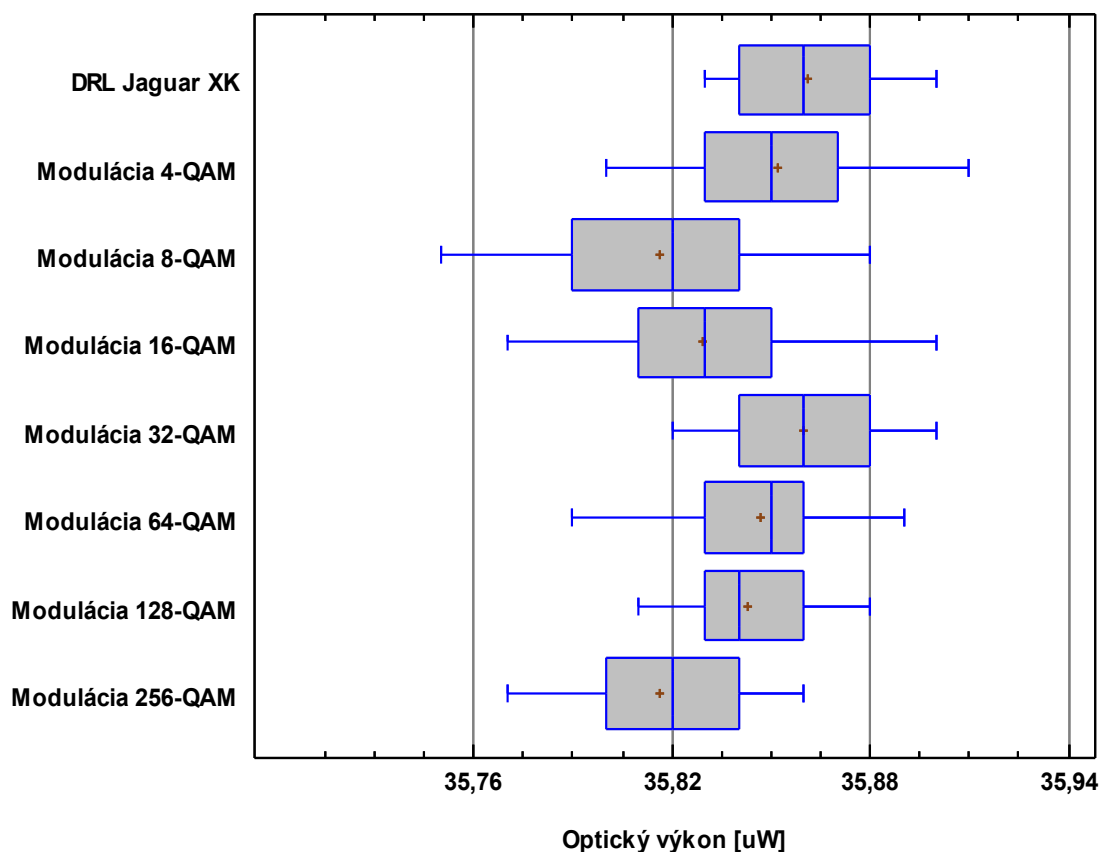


Z krabicového grafu a numerickej variabilnej analýzy vyplývajú nepatrné zmeny v minimálnych a maximálnych hodnotách dosiahnutého optického výkonu, kde sa jedná o zmenu v optickom výkone približne 0,06 %. Zároveň priemerný pokles optického výkonu v prípade modulácií QPSK a 16-PSK bol 0,02 %, pričom modulácie BPSK a 8-PSK nevykazovali žiadnu štatistickú zmenu poklesu priemerného optického výkonu, viď tab. 10.1.

Na základe dosiahnutých výsledkov štatistickej analýzy môžeme konštatovať, že pri použití modulačných formátov M-PSK nenastáva žiaden štatistický významný rozdiel v poklese optického výkonu DRL na hladine významnosti 5 %. Pokles optického výkonu DRL je teda zanedbateľný a nemá vplyv na danú funkciu svetlometu.

### 10.3.2 Štatistická analýza modulácií M-QAM

Štatistická analýza pokročilých modulačných formátov M-QAM bola realizovaná pre modulácie 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM a 256-QAM v závislosti na nosnej frekvencii 1 MHz – 1 GHz.



Obrázok 10.6: Krabicové grafy testovaných M-QAM modulácií vzhľadom k zmene nosnej frekvencie 1 MHz – 1 GHz.

Na obr. 10.6 je zobrazená štatistická analýza M-QAM modulácií prostredníctvom krabicového grafu a následná tabuľka 10.2 udáva výsledky numerickej variabilnej analýzy.

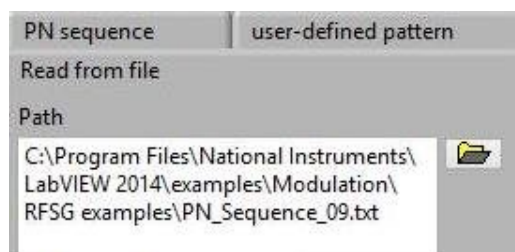
Tabuľka 10.2: Štatistické spracovanie výsledkov závislosti optického výkonu DRL Jaguar XK na použitej modulácii M-QAM.

Charakteristika Merania	Typ modulácie M-QAM				
	-	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM
Počet	61	61	61	61	61
Smerodajná odchýlka	0,019	0,032	0,033	0,031	0,023
Priemer [ $\mu$ W]	35,86	35,85	35,82	35,83	35,86
Priemer [%]	100 %	99,97 %	99,89 %	99,92 %	100 %
Minimum [ $\mu$ W]	35,83	35,8	35,75	35,77	35,82
Maximum [ $\mu$ W]	35,9	35,91	35,88	35,9	35,9
	64-QAM	128-QAM	256-QAM		
Počet	61	61	61		
Smerodajná odchýlka	0,025	0,018	0,026		
Priemer [ $\mu$ W]	35,85	35,84	35,82		
Priemer [%]	99,97 %	99,94 %	99,89 %		
Minimum [ $\mu$ W]	35,79	35,81	35,77		
Maximum [ $\mu$ W]	35,89	35,88	35,86		

Pokročilé modulačné formáty M-QAM vykazujú na základe numerickej variabilnej analýzy a krabicového grafu čiastočne vyššie rozdiely v minimálnych a maximálnych hodnotách dosiahnutého optického výkonu oproti moduláciám M-PSK, kde sa v tomto prípade jedná o zmenu približne 0,17 % vzhľadom k testovanej modulácii, viď obr. 10.6. Pokles priemerného optického výkonu bol zaznamenaný v prípade všetkých typov M-QAM modulácií s výnimkou 32-QAM, kde nebol dosiahnutý žiaden štatistický rozdiel, viď tab. 10.2.

Výsledkom štatistickej analýzy dosiahnutých výsledkov je konštatovanie, že použitie pokročilých modulačných formátov M-QAM nemá štatisticky významný vplyv na rozdiel v poklese optického výkonu DRL na hladine významnosti 5 %. Pokles optického výkonu DRL svetlometu Jaguar XK je teda aj v prípade pokročilých modulačných formátov M-QAM zanedbateľný a nemá vplyv na danú funkciu svetlometu.

Počas testovania bola použitá pseudonáhodná postupnosť kombinácie bitov a rovnako bola importovaná vlastná postupnosť bitov pre analýzu vplyvu dlhého sledu log 0 a log 1 na optický výkon DRL, viď obr. 10.7.



Obrázok 10.7: Nastavenie bitovej sekvencie generátora VSG NI PXI-5670.

## Záver

Cieľom diplomovej práce bola štúdia zaoberajúca sa problematikou optických bezvláknových dátových sietí využívajúcich oblasť viditeľného optického žiarenia VLC so zameraním na komunikáciu medzi vozidlami V2V. Konkrétne práca analyzuje vplyv pokročilých modulačných formátov na fotometrické veličiny a homogenitu vyžarovania funkcie denného svietenia DRL svetlometu Jaguar XK model 2011.

V teoretickej časti sú popísané zdroje optického žiarenia používané v automobilovom priemysle (LED, OLED) pri návrhu svetlometov spolu s ich základnými fyzikálnymi princípmi fungovania. Ďalej je poskytnutý prehľad o medzinárodnom predpise ECE R 87 a zákonných nariadeniach o cestnej premávke týkajúcich sa DRL svetlometu. Takisto sú rozobraté fotometrické a elektrické vlastnosti zdrojov LED dôležité pri návrhu jednotlivých funkcií svetlometu a optické aplikácie používané pre usmernenie viditeľného optického žiarenia danej svetelnej funkcie vzhľadom k funkčným princípom, dizajnovému návrhu a zákonným požiadavkám pre vonkajšie osvetlenie v automobilovom priemysle.

Nasledujúca časť obsahuje rozbor súčasných štúdií v oblasti V2V komunikácie a možnosti využitia kamerového systému vozidla k prijímaniu a spracovaniu optického signálu (komunikačný senzor OCI). Ďalej sú analyzované súčasné automobilové zbernicové systémy so zameraním na komunikačnú zbernicu FlexRay.

Praktická časť je zameraná na testovanie parametrov funkcie DRL svetlometu Jaguar XK a analýzu možnosti jej nasadenia ako optického vysielateľa v reálnej V2V komunikácii. Testovanie bolo realizované v priestoroch laboratórií telekomunikačnej techniky na Vysokej škole báňskej – Technickej univerzity Ostrava a na výskumnom oddelení firmy Varroc Lighting Systems s.r.o. V úvode praktickej časti sú spracované špecifikácie použitých zariadení, koncept vysielacieho systému J.1, ich konfigurácie a nastavenia potrebné pre prevádzku systému.

Experimentálne merania na VŠB-TU Ostrava sa sústreďujú na testovanie navrhnutého vysielacieho systému J.1, ktorý využíva funkciu DRL svetlometu k optickému prenosu informácií prostredníctvom pokročilých modulačných formátov. V prvej fáze bola analyzovaná šírka prenosového pásma zdrojov LED použitých v jednotlivých segmentov a na jej základe boli stanovené nosné frekvencie pre prenos a to 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz a 10 MHz. Koncept vysielacieho systému je založený na zariadení Bias-Tee ZX85-12G+, ktorý slúži pre zlúčenie jednosmerného signálu  $I_{F(s)} = 240 \text{ mA}$  na DC porte s rádiovým signálom  $I_F = 40 \text{ mA}$  na RF porte. Systém J.1 využíva pre realizáciu modulácií sofistikovaný softvér LabVIEW 2014 s knižnicou funkcií Modulation Toolkit, ktorá je doplnená o hardwarovú časť v podobe signálového generátora VSG NI PXI-5670 a analyzátoru VSA NI PXI-5661 od firmy National Instruments. Analyzované boli prenosové vlastnosti s využitím pokročilých modulačných formátov M-PSK a M-QAM, pričom boli použité sady testov pre meranie prenosových rýchlostí a chybovosti prenosu (MER,  $\text{EVM}_{\text{RMS}}$ ) vzhľadom k stanoveným referenčným vzdialenostiam. Na základe nameraných dát sa podľa predpokladov javila modulácia M-QAM ako výhodnejší formát pre prenos informácií vzhľadom k dosiahnutým vysokým prenosovým rýchlostiam až

7,8 Mbit/s (64-QAM pri nosnej frekvencii 2 MHz) a stability prenosu v rámci celého optického komunikačného kanálu. Vplyv nosnej frekvencie na prenosovú rýchlosť je z dôvodu zvýšenia symbolovej rýchlosti, ktorá môže byť maximálne  $\frac{1}{2}$  nosnej vlny. Chybovosť prenosu v podobe parametra MER a  $EVM_{RMS}$  rástla spolu s nosnou frekvenciou, pričom v prípade viacstavových modulácií a hraničnej nosnej frekvencie 10 MHz dochádzalo k rozpadu spojenia.

Druhá časť testovania v laboratóriu temná miestnosť obsahuje výsledky štatistickej analýzy vplyvu pokročilých modulačných formátov M-PSK a M-QAM na zmenu optického výkonu DRL svetlometu Jaguar XK s využitím analyzačného nástroja Statgraphics Centurion XVII. Pokles optického výkonu bol z hľadiska reálneho nasadenia prenosového systému zanedbateľný a predstavoval maximálny rozdiel v optickom výkone 0,02 % v prípade modulácií M-PSK a 0,11 % v prípade modulačného formátu M-QAM.

Finálna analýza fotometrických veličín a homogenity vyžarovania DRL svetlometu Jaguar XK v spoločnosti Varroc Lighting Systems s.r.o. bola realizovaná s pôvodnou riadiacou elektronikou a navrhnutým konceptom vysielacieho systému J.1 využívajúcim k prenosu dát pokročilý modulačný formát 64-QAM s nosnou frekvenciou 2 MHz. Výsledný rozdiel vyhodnotený na základe isocandelovej mapy, protokolu intenzít v meracích bodoch a jasovej mapy nepredstavuje žiadnu štatisticky významnú zmenu, pričom DRL s nasadeným systémom J.1 spĺňa predpis ECE R 87 a rovnako aj požiadavky zákazníka na homogenitu danej funkcie. Minimálne zmeny fotometrických veličín sú pravdepodobne spôsobené zásahom do reflektorovej časti svetlometu, ktorá bola nutná z hľadiska nasadenia systému J.1 a rovnako miernym kolísaním prevádzkovej teploty svetlometu.

Čo sa týka možnosti ďalšieho zlepšovania prenosových vlastností navrhnutého vysielacieho systému J.1 pri nasadení v komunikácii V2V do budúcnosti, bolo by vhodné na strane detektora využiť kamerový systém vozidla s optickým komunikačným obrazovým senzorom OCI. Ten predstavuje budúcnosť detekcie optického signálu v oblasti V2V komunikácie, pričom ponúka možnosť využitia stávajúcej technológie používanej vo vozidlách.

## Použitá literatura

- [1] HABEL, Jiří. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] MINISTERSTVO VNÚTRA SLOVENSKEJ REPUBLIKY. PREZÍDIUM POLICAJNÉHO ZBORU odbor dopravnej polície. Prehľad dopravných nehôd zaevidovaných v jednotlivých krajoch SR. Slovenská republika, 2013.
- [3] AUDI. Technology portal: Hochintegriertes System: Audi liegt bei der LED-Technologie an der Spitze. 2011. Dostupné z: <http://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/lichttechnologie/led-scheinwerfer>.
- [4] BIMMERPOST NEWS. BMW M4 Concept Iconic Lights. Introducing BMW's LaserLight 2.0 and OLED. 2015. Dostupné z: <http://www.bimmerpost.com/?s=BMW+M4+Concept+Iconic+Lights.+Introducing+BMW%27s+LaserLight+2.0+and+OLED>.
- [5] MARTÍNEK, Michal. Bezpečnost vozidel silničního provozu: Osvětlení vozidel a jeho vliv na bezpečnost. s. 20.
- [6] HAJDUK, Peter. Studium rozložení světla mikrobuňky optické bezvláknové sítě. 2013. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Koudelka.
- [7] EHK 48. Jednotné ustanovenia pre homologizáciu vozidiel z hľadiska montáže zariadení pre osvetlenie a svetelnú signalizáciu. Add.47/Rev.1. 2011.
- [8] Zákon č. 725/2004 Z. z. o podmienkach prevádzky vozidiel v premávke na pozemných komunikáciách a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Zb. Národnej rady Slovenskej republiky z 2. decembra 2004.
- [9] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. Světelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [10] SCHUBERT, E. Light-emitting diodes. 2nd ed. Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-6538-7.
- [11] HANULÁK, Patrik. Měření barevných souřadnic LED diod používaných v automobilovém vnějším osvětlení. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [12] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. Sdílení tepla a proudění. 2012. ISBN 978-80-248-2576-2. Operační program Vzděláváním pro konkurenceschopnost. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [13] ŠKODA, model Superb. Elektrická zařízení: Řídicí jednotky ve vozidle. [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://auto.xf.cz/>.

- [14] MARTOCH, Jan. VARROC LIGHTING SYSTEMS, s. r. o. Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public s. r. o., 1998-, roč. 2013, č. 03. ISSN 1212-0812.
- [15] EHK 87. Jednotné ustanovenia pre schvaľovanie denných svietidiel motorových vozidiel. Add.86/Rev.9.2009.
- [16] GHASSEMLOOY, Zabih, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3.
- [17] HRANILOVIC, Steve, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. Wireless optical communication systems: system and channel modelling with MATLAB. New York: Springer, 2005, xii, 196 s. ISBN 03-872-2784-9.
- [18] P. Daukantas, "Optical wireless communications: The new 'hot spots'?" Opt. Photon. News, vol. 25, no. 3, pp. 34–41, Mar. 2014.
- [19] S. Haruyama, "Visible light communications," in Proc. 36th Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun., Sep. 2010, pp. 1–22.
- [20] TAKAI, Isamu, Tomohisa HARADA, Michinori ANDOH, Keita YASUTOMI, Keiichiro KAGAWA a Shoji KAWAHITO. Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and Camera Receiver. IEEE Photonics Journal. 2014, vol. 6, issue 5, s. 1-14. DOI: 10.1109/jphot.2014.2352620.
- [21] A.-M. Cailean et al., "Design and implementation of a visible light communications system for vehicle applications," in Proc. 21st Telecommun. Forum, Nov. 2013, pp. 349–352.
- [22] M. S. Z. Sarker et al., "Design and implementation of a CMOS light pulse receiver cell array for spatial optical communications," Sensors, vol. 11, no. 2, pp. 2056–2076, Feb. 2011.
- [23] VOJÁČEK, Antonín. FlexRay: Použití komunikace FlexRay a integrované řadiče Freescale. [online]. [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/pouziti-komunikace-flexray-a-integrované-radice-freescale.html>.
- [24] TYCO ELECTRONICS. APPLICATION NOTE: Circuit Protection Considerations for Automotive Information Busses.
- [25] MINI-CIRCUITS. Coaxial Bias-Tee: ZX85-12G+. Brooklyn, NY. Dostupné z: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX85-12G+.pdf>.
- [26] ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [27] DOBEŠ, Josef. Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-7300-132-2.

- [28] HOREVAJ, Michal. Vysokofrekvenční měřicí technika: Digitální modulace. ČVUT-FEL. [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://horevaj.com/horevaj/11.html>.
- [29] EYE PATTERN: PSK system. WORLD HERITAGE ENCYCLOPEDIA™. [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: [http://www.worldheritage.org/articles/Eye\\_pattern](http://www.worldheritage.org/articles/Eye_pattern).
- [30] MARTINEK, Radek. DEMONSTRACE ZÁKLADNÍCH MODULAČNÍCH SCHÉMAT ASK, PSK A QPSK (GENERACE A DEMODULACE). Tento výukový materiál vznikl za podpory FRVŠ – projektu 498/2011 (Inovace předmětu Měření v telekomunikační technice), 41 s, Ostrava, březen 2011.
- [31] MARTINEK, Radek. GENEROVÁNÍ DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM MODULÁRNÍHO SYSTÉMU HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO GENERÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. Tento výukový materiál vznikl za podpory FRVŠ – projektu 498/2011 (Inovace předmětu Měření v telekomunikační technice), 35 s, Ostrava, duben 2011.
- [32] MARTINEK, Radek. ANALÝZA DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO ANALYZÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. Tento výukový materiál vznikl za podpory FRVŠ – projektu 498/2011 (Inovace předmětu Měření v telekomunikační technice), 38 s, Ostrava, duben 2011.
- [33] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. The Real Implementation of ANFIS Channel Equalizer on the System of Software-Defined Radio. In Journal: IETE Journal of Research. Taylor & Francis, London, UK, 2014, Volume 60, Issue 2, pages 183-193, ISSN 0377-2063 (Print), 0974-780X (Online), DOI:10.1080/03772063.2014.914698.
- [34] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. The implementation of channel coding into the digital transmission chain consisting of VSG PXI-5670 - VSA PXI-5661. In Journal: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Volume 89, Issue 7, 2013, Warszawa, Poland, pp. 64-68, ISSN 0033-2097.
- [35] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan; TOMALA, Karel. BER Measurement in Software Defined Radio Systems. In Journal: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Volume 89, Issue 2B, 2013, Warszawa, Poland, pp. 205-210, ISSN 0033-2097.
- [36] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. The real implementation of NLMS channel equalizer into the system of software defined radio. In Journal: Advances in Electrical and Electronic Engineering, Volume 10, Issue 5, December 2012, Pages 330-336, VSB - Technical University of Ostrava and University of Zilina Faculty of Electrical Engineering, ISSN 1336-1376 (Print) ISSN 1804-3119 (Online), MK CR E 20146.
- [37] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. Application of synthetic instrumentation that applies the trend of software-based approach for measuring on the field of modern wireless

transfer systems. In International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC). Volume 2, Number 3, Published by The Society of Digital Information and Wireless Communications, Kowloon, Hong Kong, 2012. pp. 208-221, ISSN: 2225-658X.

- [38] AL-WOHAISHI, Mohamed; ZIDEK, Jan; MARTINEK, Radek. Analysis of M State Digitally Modulated Signals in Communication Systems Based on SDR Concept. In Proceedings: The 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications; first issue. Praha, Czech Republic; IEEE Ukraine & ČVUT Praha, 2011, pp. 171-175, ISBN 978-1-4577-1423-8.
- [39] AL-WOHAISHI, Mohamed; MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. Communications in Computer and Information Science, Digital Information Processing and Communications, Part II : In Proceedings of International Conference on Digital Information processing and Communications, ICDIP2011, Ostrava, Czech Republic. 1st Edition, Volume 189, Part 13. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2011. Analysis of M-QAM Data Communication System Using 3D Eye Diagram. pp. 337-348. ISBN 978-3-642-22409-6, ISSN 1865-0929, DOI: 10.1007/978-3-642-22410-2.
- [40] MARTINEK, Radek; AL WOHAISHI, Mohamed; ZIDEK, Jan. Software Based Flexible Measuring Systems for Analysis of Digitally Modulated Systems. In Conference Proceedings: The 9th Roedunet International Conference, RoEduNet. Sibiu, Romania, 24-26 June 2010, pp. 397-402, ISBN 978-1-4244-7335-9, ISSN 2068-1038.



## Zoznam príloh

Príloha A:	Fotografie riešenia vysielacieho systému DRL Jaguar XK.....	I
Príloha B:	Výsledky testovania DRL svetlometu Jaguar XK vo firme Varroc s.r.o. ....	II
Príloha C:	Výsledky testovania DRL svetlometu Jaguar XK na VŠB-TU Ostrava .....	IV

Súčasťou DP je CD/DVD.

Adresárová štruktúra priloženého CD/DVD:

1. Výsledky merania fotometrických veličín DRL Jaguar XK (Varroc Lighting Systems s.r.o.).
2. Výsledky merania homogenity DRL Jaguar XK (Varroc Lighting Systems s.r.o.).
3. Výsledky merania prenosových rýchlostí M-PSK (M1, M2).
4. Výsledky merania prenosových rýchlostí M-QAM (M2).
5. Výsledky merania chybovosti M-PSK ( $EVM_{RMS}$ , MER).
6. Výsledky merania chybovosti M-QAM ( $EVM_{RMS}$ , MER).
7. IQ diagram a oko diagram modulácií M-PSK (M1, M2).
8. IQ diagram a oko diagram modulácií M-QAM (M2).
9. Štatistická analýza nosnej frekvencie (M-PSK, M-QAM).
10. Frekvenčná charakteristika Bias-Tee ZX85-12G+ a DRL Jaguar XK.
11. Simulácie NI Multisim 13.0.
12. Datasheet Bias-Tee ZX85-12G+.
13. Fotografie experimentálneho pracoviska a svetlometu Jaguar XK.

---

Príloha A:      Fotografie riešenia vysielacieho systému DRL Jaguar XK

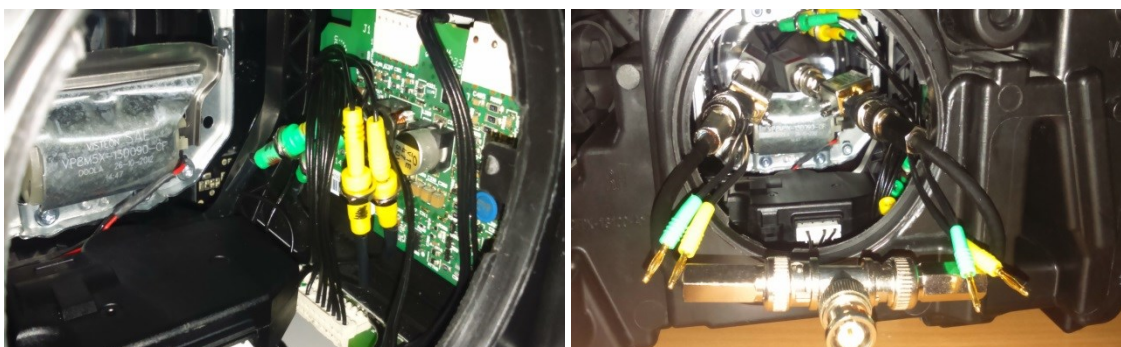
Obrázok A.1:    *Demontované časti svetlometu Jaguar XK (DRL spolu s reflektorovou časťou a základné puzdro obsahujúce riadiacu elektroniku, AFS modul a LED smerové svetlo).*



Obrázok A.2:    *Kompletné demontované časti svetlometu Jaguar XK model 2011 zložené zo základného puzdra, reflektorovej časti a krycieho skla svetlometu.*



Obrázok A.3:    *Integrácia navrhnutého vysielacieho systému J.1 v svetlomete Jaguar XK medzi pôvodnú riadiacu elektroniku a DRL svetlometu.*



---

Príloha B:      *Výsledky testovania DRL svetlometu Jaguar XK vo firme Varroc s.r.o.*

Tabuľka B.1:    *Protokol intenzít v testovaných meracích bodoch denného svietenia Jaguar XK s pôvodnou riadiacou elektronikou svetlometu.*

<b>Funkcia</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Hodnota</b>	<b>H</b>	<b>V</b>
Po 1 minúte					
H - V	400	1200	724,20	0.00°	0.00°
Po 30 minútach					
H - V	400	1200	641,40	0.00°	0.00°
5U – 20L	40	1200	129,20	-20.00°	5.00°
H – 20L	100	1200	159,00	-20.00°	0.00°
5D – 20L	40	1200	100,50	-20.00°	-5.00°
5D – 10L	80	1200	368,50	-10.00°	-5.00°
H – 10L	280	1200	494,30	-10.00°	0.00°
5U – 10L	80	1200	424,80	-10.00°	5.00°
10U – 5L	80	1200	279,90	-5.00°	10.00°
H – 5L	360	1200	649,40	-5.00°	0.00°
10U – V	80	1200	255,10	0.00°	10.00°
5U – V	280	1200	459,60	0.00°	5.00°
5D – V	280	1200	519,70	0.00°	-5.00°
H – 5R	360	1200	482,80	5.00°	0.00°
10U -5R	80	1200	197,50	5.00°	10.00°
5U – 10R	80	1200	218,60	10.00°	5.00°
H – 10R	280	1200	296,70	10.00°	0.00°
5D – 10R	80	1200	282,60	10.00°	-5.00°
5D – 20R	40	1200	138,10	20.00°	-5.00°
H – 20R	100	1200	128,70	20.00°	0.00°
5U – 20R	40	1200	106,00	20.00°	5.00°
Viditeľnosť	1	1200	(74,49) 654,42	(-20.00°) -4.25°	(10.00°) -0.50°

Tabuľka B.2: *Protokol intenzít v testovaných meracích bodoch denného svietenia Jaguar XK s využitím vysielacieho systému J.1.*

<b>Funkcia</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Hodnota</b>	<b>H</b>	<b>V</b>
Po 1 minúte					
H - V	400	1200	704,80	0.00°	0.00°
Po 30 minútach					
H - V	400	1200	633	0.00°	0.00°
5U – 20L	40	1200	112	-20.00°	5.00°
H – 20L	100	1200	150	-20.00°	0.00°
5D – 20L	40	1200	101	-20.00°	-5.00°
5D – 10L	80	1200	349	-10.00°	-5.00°
H – 10L	280	1200	471	-10.00°	0.00°
5U – 10L	80	1200	388	-10.00°	5.00°
10U – 5L	80	1200	280	-5.00°	10.00°
H – 5L	360	1200	623	-5.00°	0.00°
10U – V	80	1200	269	0.00°	10.00°
5U – V	280	1200	445	0.00°	5.00°
5D – V	280	1200	484	0.00°	-5.00°
H – 5R	360	1200	498	5.00°	0.00°
10U -5R	80	1200	212	5.00°	10.00°
5U – 10R	80	1200	232	10.00°	5.00°
H – 10R	280	1200	326	10.00°	0.00°
5D – 10R	80	1200	292	10.00°	-5.00°
5D – 20R	40	1200	146	20.00°	-5.00°
H – 20R	100	1200	136	20.00°	0.00°
5U – 20R	40	1200	113	20.00°	5.00°
Viditeľnosť	1	1200	(69,5) 650	(-20.00°) -4.25°	(10.00°) -0.50°

Príloha C: Výsledky testovania DRL svetlometu Jaguar XK na VŠB-TU Ostrava

Tabuľka C.1: Chybovosť systému M1 v podobe parametra  $EVM_{RMS}$  a MER modulácií M-PSK.

Modulácia	Nosná [MHz]	Symbolová rýchlosť [kHz]	-	Referenčná vzdialenosť [m]			
				0	0,3	0,9	1,5
BPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,31	1,48	3,72	7,32
			MER [dB]	37,51	36,58	28,59	22,71
BPSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,22	2,16	5,51	11,83
			MER [dB]	35,1	33,31	25,17	18,54
BPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	5,12	9,79	26,15	52,74
			MER [dB]	22,1	20,18	11,65	5,56
BPSK	10	100	$EVM_{RMS}$	20,68	45,52	52,69	67,51
			MER [dB]	8,83	6,84	5,56	3,41
QPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,28	1,49	3,5	7,87
			MER [dB]	37,88	36,54	29,12	22,09
QPSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,19	2,3	5,88	10,35
			MER [dB]	38,49	32,77	24,4	19,7
QPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	3,91	8,79	24,5	43,79
			MER [dB]	28,16	21,12	12,22	7,17
QPSK	10	100	$EVM_{RMS}$	20,85	50,76	55,21	56,18
			MER [dB]	13,62	5,89	5,16	5,01
8-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,98	1,75	4,25	9,03
			MER [dB]	40,16	35,16	27,43	20,89
8-PSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,25	2,18	19,86	21,5
			MER [dB]	38,09	33,24	14,04	13,35
8-PSK	5	100	$EVM_{RMS}$	3,69	8,88	27,59	33,97
			MER [dB]	28,66	21,04	11,18	9,38
8-PSK	10	100	$EVM_{RMS}$	20,18	31,94	45,05	41,5
			MER [dB]	13,9	9,91	6,93	7,64
16-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,18	1,57	4,22	10,88
			MER [dB]	38,54	36,07	27,49	19,27
16-PSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,43	2,2	11,83	12,93
			MER [dB]	36,92	33,14	18,54	17,77
16-PSK	5	100	$EVM_{RMS}$	11,03	8,82	22,52	31,14
			MER [dB]	19,15	21,09	12,95	10,13
16-PSK	10	100	$EVM_{RMS}$	18,41	88,47	38,48	34,25
			MER [dB]	14,7	9,67	8,30	9,31

Tabuľka C.2: Chybovosť systému M2 v podobe parametra  $EVM_{RMS}$  a MER modulácií M-PSK.

Modulácia	Nosná [MHz]	Symbolová rýchlosť [kHz]	-	Referenčná vzdialenosť [m]			
				0	1	3	7
BPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,37	1,39	1,41	2,44
			MER [dB]	37,2	37,16	37,01	32,24
BPSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,68	1,67	2,01	3,85
			MER [dB]	35,51	35,53	33,93	28,29
BPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	1,54	3,03	5,35	15,83
			MER [dB]	36,27	30,38	25,44	16,01
BPSK	10	100	$EVM_{RMS}$	3,26	5,96	19,94	30,44
			MER [dB]	29,75	24,5	14,01	10,33
QPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,3	1,21	1,5	2,26
			MER [dB]	37,72	38,66	36,5	32,93
QPSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,63	1,75	1,78	3,09
			MER [dB]	35,75	35,16	34,99	30,21
QPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	1,56	3,28	6,74	17,04
			MER [dB]	36,15	26,69	23,43	15,37
QPSK	10	100	$EVM_{RMS}$	2,99	6,6	25,58	32,08
			MER [dB]	30,48	23,61	11,84	9,88
8-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,28	1,34	1,45	2,31
			MER [dB]	37,86	37,46	36,78	32,73
8-PSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,79	1,61	2,04	4,64
			MER [dB]	34,97	35,87	33,82	26,67
8-PSK	5	100	$EVM_{RMS}$	1,35	2,79	6,89	27,14
			MER [dB]	37,4	31,08	23,24	11,33
8-PSK	10	100	$EVM_{RMS}$	3,2	4,54	28,75	35,89
			MER [dB]	29,91	26,86	10,83	8,9
16-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	1,25	1,69	1,66	2,27
			MER [dB]	38,06	35,46	28,66	32,88
16-PSK	2	100	$EVM_{RMS}$	1,68	1,67	12,2	3,32
			MER [dB]	35,47	35,54	28,28	29,58
16-PSK	5	100	$EVM_{RMS}$	1,37	3,43	5,74	21,43
			MER [dB]	37,25	29,28	24,82	13,88
16-PSK	10	100	$EVM_{RMS}$	2,81	12,82	15,64	24,07
			MER [dB]	31,01	17,84	16,11	12,37

Tabuľka C.3: Chybovosť systému M2 v podobe parametra  $EVM_{RMS}$  a MER modulácii M-QAM.

Modulácia	Nosná [MHz]	Symbolová rýchlosť [kHz]	-	Referenčná vzdialenosť [m]			
				0	1	3	7
4-QAM	1	100	$EVM_{RMS}$	0,23	0,61	1,58	8,27
			MER [dB]	44,42	39,51	32,99	18,54
4-QAM	2	100	$EVM_{RMS}$	0,34	0,78	2,28	13,69
			MER [dB]	43,66	38,08	29,07	14,58
4-QAM	5	100	$EVM_{RMS}$	1,13	4,35	11,6	16,52
			MER [dB]	35,37	23,45	15,47	4,57
4-QAM	10	100	$EVM_{RMS}$	3,65	6,04	8,9	18,01
			MER [dB]	26,02	21,7	13,1	3,4
8-QAM	1	100	$EVM_{RMS}$	0,32	0,65	1,44	9,17
			MER [dB]	42,73	40,14	33,68	18,9
8-QAM	2	100	$EVM_{RMS}$	0,35	1,07	2,4	20,75
			MER [dB]	43,55	36,88	28,97	10,2
8-QAM	5	100	$EVM_{RMS}$	1,22	4,96	15,99	36,19
			MER [dB]	35,28	23,69	12,17	6,95
8-QAM	10	100	$EVM_{RMS}$	3,72	6,1	9,2	10,1
			MER [dB]	26,32	21,74	11,9	3,1
16-QAM	1	100	$EVM_{RMS}$	0,37	0,99	2,22	10,49
			MER [dB]	44,48	39,73	32,36	18,6
16-QAM	2	100	$EVM_{RMS}$	0,5	1,3	3,54	24,35
			MER [dB]	42,55	37,4	29,03	11,43
16-QAM	5	100	$EVM_{RMS}$	1,95	6,24	20,55	29,67
			MER [dB]	34,47	23,32	12,58	9,55
16-QAM	10	100	$EVM_{RMS}$	5,36	7,85	21,8	30,1
			MER [dB]	26,33	21,02	11,4	8,75
32-QAM	1	100	$EVM_{RMS}$	0,45	0,89	2,34	17,44
			MER [dB]	41,32	39,82	33,48	14,89
32-QAM	2	100	$EVM_{RMS}$	0,62	1,78	4,91	20,66
			MER [dB]	41,2	35,55	24,77	14,04
32-QAM	5	100	$EVM_{RMS}$	1,69	6,6	18,23	26,35
			MER [dB]	34,77	23,56	13,91	11,96
32-QAM	10	100	$EVM_{RMS}$	5,43	7,61	19,03	20,37
			MER [dB]	24,96	20,11	12,5	10,46

64-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	1,86	1,14	2,45	13,14
			MER [dB]	34,25	38,39	32,85	17,23
64-QAM	2	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,55	1,9	4,31	18,63
			MER [dB]	42,83	34,72	28,16	15,9
64-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	2,65	14,3	14,7	22,59
			MER [dB]	31,1	16,63	17,2	14,2
64-QAM	10	100	EVM <sub>RMS</sub>	11,33	11,75	15,1	22,9
			MER [dB]	17,14	19,1	16,5	13,8
128-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,87	0,9	2,56	10,52
			MER [dB]	41,88	39,04	32,9	21,5
128-QAM	2	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,79	2,21	3,48	13,5
			MER [dB]	39,49	36,09	28,82	19,88
128-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	2,01	7,41	9,97	17,56
			MER [dB]	34,65	21,64	19,81	14,66
128-QAM	10	100	EVM <sub>RMS</sub>	9,53	8,7	10,5	18,9
			MER [dB]	20,38	20,13	18,4	12,7
256-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,74	1,73	3,01	9,51
			MER [dB]	41,74	35,86	32,68	20,58
256-QAM	2	100	EVM <sub>RMS</sub>	1,24	2,17	7,57	10,68
			MER [dB]	40,25	36,74	23,53	19,86
256-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	2,49	7,18	8,59	14,42
			MER [dB]	34,09	22,74	21,45	15,84
256-QAM	10	100	EVM <sub>RMS</sub>	6,26	8,6	12,3	15,8
			MER [dB]	23,66	21,4	15,4	12,4

Tabuľka C.4: Prenosová rýchlosť systému M1 v prípade modulácií M-PSK vzhľadom k stanoveným referenčným vzdialenostiam.

Modulácia	Nosná [MHz]	Referenčná vzdialenosť [cm]				Referenčná vzdialenosť [cm]			
		0	30	90	150	0	30	90	150
		Symbolová rýchlosť [MHz]				Prenosová rýchlosť [Mbit/s]			
BPSK	1	1,15	1,1	1	0,6	1,15	1,1	1	0,6
BPSK	2	1,75	1,7	1,65	0,7	1,75	1,7	1,65	0,7
BPSK	5	2	1,8	1,2	0,2	2	1,8	1,2	0,2
BPSK	10	0,5	0,1	-	-	0,5	0,1	-	-
QPSK	1	1,1	1,05	1	0,95	2,2	2,1	2	1,9
QPSK	2	1	0,9	0,8	0,55	2	1,8	1,6	1,1



QPSK	5	0,9	0,8	0,5	0,1	1,8	1,6	1	0,2
QPSK	10	0,2	0,1	-	-	0,4	0,2	-	-
8-PSK	1	1,2	1,2	1,1	0,4	3,6	3,6	3,3	1,2
8-PSK	2	1,6	1,58	1,55	0,25	4,8	4,74	4,65	0,75
8-PSK	5	1,5	1,45	0,3	-	4,5	4,35	0,9	0,1
8-PSK	10	0,1	-	-	-	0,3	-	-	-
16-PSK	1	1,15	1,12	1	0,6	4,6	4,48	4	2,4
16-PSK	2	1,6	1,2	0,9	0,2	6,4	4,8	3,6	0,8
16-PSK	5	1,1	0,95	0,3	0,1	4,4	3,8	1,2	0,4
16-PSK	10	0,1	-	-	-	0,4	-	-	-

Tabuľka C.5: *Prenosová rýchlosť systému M2 v prípade modulácií M-PSK vzhľadom k stanoveným referenčným vzdialenostiam.*

Modulácia	Nosná [MHz]	Referenčná vzdialenosť [m]				Referenčná vzdialenosť [m]			
		0	1	3	7	0	1	3	7
		Symbolová rýchlosť [MHz]				Prenosová rýchlosť [Mbit/s]			
BPSK	1	0,85	0,7	0,6	0,5	0,85	0,7	0,6	0,5
BPSK	2	0,7	0,5	0,42	0,41	0,7	0,5	0,42	0,41
BPSK	5	0,8	0,48	0,38	0,18	0,8	0,48	0,38	0,18
BPSK	10	2,5	0,4	0,2	0,15	2,5	0,4	0,2	0,15
QPSK	1	1	1,03	1	1	2	2,06	2	2
QPSK	2	0,9	0,8	0,8	0,7	1,8	1,6	1,6	1,4
QPSK	5	1,2	1,1	0,75	0,4	2,4	2,2	1,5	0,8
QPSK	10	0,9	1	0,1	0,05	1,8	2	0,2	0,1
8-PSK	1	1,2	1,2	1,1	1	3,6	3,6	3,3	3
8-PSK	2	1,1	1,06	1,05	0,9	3,3	3,18	3,15	2,7
8-PSK	5	2,4	0,8	0,4	0,07	7,2	2,4	1,2	0,21
8-PSK	10	0,79	0,5	0,08	0,02	2,37	1,5	0,24	0,06
16-PSK	1	1,4	1	1	0,7	5,6	4	4	2,8
16-PSK	2	1,3	0,8	0,7	0,55	5,2	3,2	2,8	2,2
16-PSK	5	1,5	0,6	0,4	0,08	6	2,4	1,6	0,32
16-PSK	10	1	0,3	0,1	0,02	4	1,2	0,4	0,08

Tabuľka C.6: Prenosová rýchlosť systému M2 v prípade modulácii M-QAM vzhľadom k stanoveným referenčným vzdialenostiam.

Modulácia	Nosná [MHz]	Referenčná vzdialenosť [m]				Referenčná vzdialenosť [m]			
		0	1	3	7	0	1	3	7
		Symbolová rýchlosť [MHz]				Prenosová rýchlosť [Mbit/s]			
4-QAM	1	1,1	1,1	0,9	0,7	2,2	2,2	1,8	1,4
4-QAM	2	2,1	2	1,5	0,5	4,2	4	3	1
4-QAM	5	1,5	1,2	0,7	0,35	3	2,4	1,4	0,7
4-QAM	10	0,7	0,5	0,3	0,1	1,4	1	0,6	0,2
8-QAM	1	1,1	1	0,9	0,6	3,3	3	2,7	1,8
8-QAM	2	1,9	1,2	0,85	0,2	5,7	3,6	2,55	0,6
8-QAM	5	0,8	0,4	0,2	0,09	2,4	1,2	0,6	0,27
8-QAM	10	0,6	0,25	0,1	0,05	1,8	0,75	0,3	0,15
16-QAM	1	1	0,8	0,6	0,25	4	3,2	2,4	1
16-QAM	2	1,3	0,9	0,7	0,34	5,2	3,6	2,8	1,36
16-QAM	5	0,46	0,3	0,2	0,1	1,84	1,2	0,8	0,4
16-QAM	10	0,32	0,13	0,1	0,05	1,28	0,52	0,4	0,2
32-QAM	1	1	0,8	0,6	0,2	5	4	3	1
32-QAM	2	1,4	1	0,7	0,3	7	5	3,5	1,5
32-QAM	5	0,5	0,35	0,1	0,09	2,5	1,75	0,5	0,45
32-QAM	10	0,2	0,1	0,05	0,02	1	0,5	0,25	0,1
64-QAM	1	0,8	0,6	0,4	0,1	4,8	3,6	2,4	0,6
64-QAM	2	1,3	0,7	0,4	0,1	7,8	4,2	2,4	0,6
64-QAM	5	0,2	0,1	0,08	0,04	1,2	0,6	0,48	0,24
64-QAM	10	0,1	0,07	0,03	0,01	0,6	0,42	0,18	0,06
128-QAM	1	0,6	0,4	0,2	0,1	4,2	2,8	1,4	0,7
128-QAM	2	0,51	0,31	0,1	0,03	3,57	2,17	0,7	0,21
128-QAM	5	0,37	0,19	0,04	0,01	2,59	1,33	0,28	0,07
128-QAM	10	0,21	0,11	0,01	0,007	1,47	0,77	0,07	0,049
256-QAM	1	0,4	0,2	0,05	0,01	3,2	1,6	0,4	0,08
256-QAM	2	0,25	0,1	0,02	0,004	2	0,8	0,16	0,032
256-QAM	5	0,1	0,004	0	0	0,8	0,032	0	0
256-QAM	10	0,04	0,001	0	0	0,32	0,008	0	0